

**PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROCESO DE RECOLECCIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS EN LA CIUDAD DE BARRANQUILLA**

JAIME EDUARDO RIZZO LÍAN

MIGUEL DAVID SANTANA GALVÁN



UNIVERSIDAD DE LA COSTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

BARRANQUILLA

2017

**PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROCESO DE RECOLECCIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS EN LA CIUDAD DE BARRANQUILLA**

JAIME EDUARDO RIZZO LÍAN

MIGUEL DAVID SANTANA GALVÁN

**Trabajo de grado para obtener el Título de
Ingeniero Industrial**

Tutor:

M.Sc. THALÍA OBREDOR BALDOVINO

Co-tutor:

M.Sc. KATHERINNE SALAS NAVARRO



UNIVERSIDAD DE LA COSTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

BARRANQUILLA

2017

Agradecimientos

Este trabajo es dedicado principalmente a DIOS por brindarnos la oportunidad de ejecutar este proyecto y escalar cada peldaño en nuestras vidas hasta este punto, a nuestras familias que con amor y esfuerzo formaron a dos ingenieros en un marco integral de valores. Igualmente, agradecer la dirección y la guía incondicional de los tutores Thalía Obredor Baldovino y Katherine Salas Navarro, a los docentes que contribuyeron a nuestra formación como profesionales y a nuestros compañeros de estudio por su apoyo moral. A todos en mención, gracias totales.

Contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
Capítulo 1: preliminares	13
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Justificación	18
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivo general	21
1.3.2 Objetivos específicos	21
1.3 Metodología propuesta	22
Capítulo 2: marco referencial	23
2.1 Marco teórico	23
2.1.1 Logística	23
2.1.2 Métodos de recolección	34
2.1.3 Tipos de Vehículo utilizados en la recolección de residuos sólidos.	36
2.1.4 Tipos de residuos	38
2.1.5 Problemáticas en el proceso de recolección de residuos	39
2.2 Estado del arte	41
2.2.1 Aplicación de la logística inversa e investigación de operaciones en la recolección de residuos sólidos	42

2.2.2 Escenarios para el estudio de los costos presentes en el proceso de recolección de residuos sólidos urbanos y domésticos	45
2.2.3 Método de recolección de residuos domésticos Curbside o en la acera	49
2.2.4 Gestión de residuos sólidos en Colombia	51
2.3 Marco conceptual	54
Capítulo 3: diseño de un modelo de optimización del proceso de recolección de residuos sólidos en barranquilla	65
3.1 Generalidades de la caracterización del proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios actual en la ciudad de Barranquilla.	65
3.2 Estructura del modelo de costos de residuos sólidos domiciliarios en Barranquilla	72
3.2.1 Estructura básica del modelo	72
3.2.2 Estructura de costos del modelo	80
3.2.3 Estructura de utilidad	89
3.3 Escenarios	99
3.3.1 Escenario Actual	99
3.3.2 Escenario 1	102
3.3.3 Escenario 2	104
3.4 Resultados	108
4. Conclusiones	120
5. Trabajos futuros	122
6. Referencias	123

Lista de figuras

Figura 1.	17
Figura 2	19
Figura 3.	27
Figura 4.	28
Figura 5.	29
Figura 6.	31
Figura 7.	31
Figura 8.	33
Figura 9.	33
Figura 10.	35
Figura 11.	35
Figura 12.	37
Figura 13.	37
Figura 14.	38
Figura 15.	39
Figura 16	70
Figura 17.	75
Figura 18.	76
Figura 19.	78
Figura 20.	108
Figura 21.	109

Figura 22. 110

Figura 23. 111

Figura 24. 112

Figura 25. 113

Figura 26. 114

Figura 27. 115

Figura 28. 116

Lista de tablas

Tabla 1	73
Tabla 2.....	79
Tabla 3.....	81
Tabla 4.....	81
Tabla 5.....	82
Tabla 6.....	87
Tabla 7.....	88
Tabla 8.....	90
Tabla 9.....	91
Tabla 10.....	92
Tabla 11.....	94
Tabla 12.....	95
Tabla 13.....	100
Tabla 14.....	101
Tabla 15.....	103
Tabla 16.....	105
Tabla 17.....	107

Resumen

La mejora logística a partir de la disminución de los costos o aumento de las utilidades del proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios tanto del flujo directo como inverso, contribuye a optimizar los recursos inmersos en este. Por ello, en el presente trabajo se estudia el proceso de recolección domiciliaria para la ciudad de Barranquilla, iniciando por la caracterización demográfica de la misma a partir del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos relacionado con el flujo directo del proceso actual, realizando un diagnóstico a partir de la información compartida por la Alcaldía de Barranquilla y la empresa encargada del proceso; posteriormente, se generan dos escenarios donde se propone separar los residuos sólidos desde la fuente, a fin de generar utilidades a partir del reciclaje o reutilización de estos, variando además la frecuencia de recolección en el segundo escenario. Como resultado, se obtiene mejora en los escenarios generados, siendo mejor el segundo por representar 26% menos en los costos anuales del proceso. Además, se proponen estrategias de mejora debido a los resultados obtenidos a partir del modelo generado para evaluación del proceso de recolección de residuos sólidos, el cual es flexible y permite evaluar los tres escenarios.

Palabras claves: Logística, flujo inverso, modelo de costos, método de recolección, residuos domiciliarios.

Abstract

Logistical improvement, based on the reduction of costs or increase of the profits of the solid waste collection process from both the direct and inverse flow, contributes to optimize the resources immersed in this. For this reason, the present work studies the process of home collection for the city of Barranquilla, starting with the demographic characterization of the same from the Integral Solid Waste Management Plan related to the direct flow of the current process, making a diagnosis from the information shared by the Mayor of Barranquilla and the company in charge of the process; later, two scenarios are generated where it is proposed to separate the solid waste from the source, in order to generate utilities from the recycling or reuse of these, also varying the frequency of collection in the second scenario. As a result, improvement is achieved in the scenarios generated, the second being better because it represents 26% less in the annual costs of the process. In addition, improvement strategies are proposed due to the results obtained from the model generated for evaluation of the solid waste collection process, which is flexible and allows to evaluate the three scenarios.

Keywords: *Logistics, reverse flow, cost model, collection method, household waste.*

Introducción

Al analizar la evolución histórica y crecimiento poblacional a nivel mundial, se evidencia como el consumismo y crisis ambiental son uno de los comportamientos y factores predominantes en la sociedad general; lo que trae consigo consecuencias que impactan fuertemente tanto en los costos para la reparación y mejora de los sistemas que mueven la actividad industrial mundial como para los componentes que hacen parte de cada una de las cadenas inmersas en dichas actividades, evidenciando la responsabilidad de cada una de los sectores económicos al momento de propiciar soluciones sostenibles con la economía, la sociedad y el medio ambiente.

Por lo anterior, se hace un paralelo entre el sector empresarial como ofertante de la gama de productos susceptibles al deseo de compra y las familias como núcleo fundamental de la sociedad según denomina la concepción de la constitución política colombiana, trayendo consigo la necesidad de compra y por ende la generación de residuos una vez estos productos hayan cumplido su ciclo de vida. Por ello, la necesidad de estudiar y combinar disciplinas como la logística inversa, logística operacional, modelos financieros y procesos de recolección de residuos que permitan dar solución a los problemas que acarrea el desconocimiento de las buenas prácticas de recolección y las pérdidas que se puedan generar por no aprovechar de manera eficiente la generación de los mismos.

Teniendo en cuenta lo anterior, para alcanzar los objetivos propuestos, el presente proyecto de grado se ha estructurado de la siguiente forma: en el capítulo I se aborda el estudio de la situación actual del proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios en la ciudad de Barranquilla, para identificar los aspectos generales, problemáticas, importancia de optimizar el proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios actual y hacer mención de posibles

soluciones o medidas a tomar. En el capítulo 2 se muestran los conceptos necesarios para el desarrollo del modelo que optimice el proceso de recolección. El capítulo 3 incluye el diseño y aplicación del modelo de costos de recolección de residuos sólidos domiciliarios en Barranquilla, donde se generan escenarios que optimicen el proceso en materia de costos por los procesos asociados a este y por las utilidades que puedan generarse a raíz de la reutilización de los residuos sólidos aprovechables, así mismo se describen los resultados e impacto del mismo. Finalmente, se presentan las conclusiones y futuros trabajos.

Capítulo 1: preliminares

1.1 Planteamiento del problema

El incremento de la generación de residuos sólidos en las ciudades de Colombia aumenta cada día por la falta de concientización y realización de programas ambientales que contribuyan a la responsabilidad ambiental por parte de todos los elementos inmersos en el sistema económico, como el comercial, las industrias, instituciones y la sociedad. Teniendo en cuenta las partes involucradas, los problemas por la generación y mala disposición de los residuos se centra en las personas en general, por ser quienes conforman los diferentes núcleos de cada una de las partes. En Colombia son 9.488.204 toneladas al año de residuos sólidos producidos aproximadamente, siendo solo el 17% la cantidad destinada al proceso de reciclaje (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios República de Colombia, 2015).

Sin embargo, los planes estratégicos logísticos y ambientales por parte del sector industrial y/o empresarial toman fuerza por las exigencias de las leyes y normativas gubernamentales, adicionando incentivos por poner en práctica acciones con aras a la minimización del impacto ambiental y sobre todo a la optimización de recursos y costos presentes en el proceso de recuperación de residuos luego de su consumo, es decir, en la cadena de logística inversa. Por ende, un buen proceso logístico en función del reciclaje y clasificación de residuos sólidos es común en algunas organizaciones. No obstante, han despreciado la relación económica del proceso de estos para su nueva utilización, aun cuando la logística inversa sea más frecuente en ellas.

Por otro lado, la manipulación dada a los residuos sólidos no es óptima en muchas ocasiones, las prácticas implementadas para su eliminación por parte de la sociedad trae consecuencias negativas por ignorar los efectos posteriores que pueden ocasionarse, un ejemplo de ello en la sociedad de la ciudad Barranquilla es verter los residuos en aguas que dan hacia fuentes hídricas grandes e importantes de la región, la incineración o quema de ellos y la generación de botaderos a cielo abierto, causando contaminación, destrucción de ecosistemas, generación de gases contaminantes, daño visual paisajístico de la ciudad y sobre costos en el proceso de recolección al momento de hacer mejoras (Groot, Bing, Bos-Brouwers, & Bloemhof-Ruwaard, 2014).

Aunque las políticas y leyes para concentrar las fuerzas en la adecuada gestión logística de residuos sólidos sean cada vez más comunes en otros países como el caso de los Europeos (Iriarte, Gabarrell, & Rieradevall, 2009), en Colombia no hay una adecuada implementación de leyes que exhorten a la sociedad de manera responsable hacer separación en la fuente de los residuos domésticos, y son pocas las acciones masivas ejecutadas por las organizaciones encargadas de la recolección de los mismos, aun cuando se tenga conocimiento que a través de una buena cadena inversa la tasa de ingreso sea alta por el tratamiento de estos.

En el departamento del Atlántico del estado colombiano, son 2043,72 toneladas por día de residuos sólidos presentados al servicio público de aseo (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios República de Colombia, 2015). Barranquilla la capital del departamento del Atlántico, por medio de datos obtenidos publicados por la empresa de aseo de la ciudad, genera un promedio mensual de 41374,517 toneladas de residuos sólidos (evaluación hecha incluyendo las diferentes eventualidades especiales presentadas en el año como los carnavales) y diario de 1295,48 toneladas por día (que van al relleno sanitario) (Superintendencia de Servicios Públicos

Domiciliarios República de Colombia, 2015) teniendo una producción per cápita en el área urbana de 0,895 Kg/hab-día, (Alcaldía de Barranquilla, 2015).

Cabe resaltar, que en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de la capital del Atlántico para los años 2016-2027, no se tienen cifras que correspondan al % en peso del material reciclado o clasificado desde la fuente, al igual que la clasificación de residuos especiales, debido a la carencia de un estudio que permita discernir el número de hogares (haciendo énfasis en el sector doméstico) que caracterizan residuos sólidos en la fuente, a nivel del área urbana.

Es importante mencionar la cifra de la generación de residuos sólidos mensual en el sector domiciliario de la ciudad de Barranquilla, la cual corresponde a 25118,666 Ton/mes según el PGIRS. Este hecho se presenta porque a pesar que se conoce la falencia existente en el casco urbano que repercute en demás campos como el social, político y económico de los entes encargados del proceso de aseo de la misma, no se han tomado acciones correctivas eficientes que permitan la optimización de costos, el desarrollo logístico, culturización y erradicación de prácticas poco efectivas para el aprovechamiento potencial de residuos.

Falencias en el aprovechamiento de residuos se presentan en el PGIRS, donde no se tiene actualizada la cifra del número de centros de acopio de la ciudad, reportando la existencia de 89 entre pequeños, grandes y medianos (información registrada por el DAMAB¹ para el año 2015), al igual que el número de recicladores de oficio, con un reporte de 219. Por otro lado, los entes encargados del servicio de aseo no tienen a la fecha información de las personas capacitadas en temas referentes a logística de recolección de residuos, se evidencia de igual forma en el PGIRS.

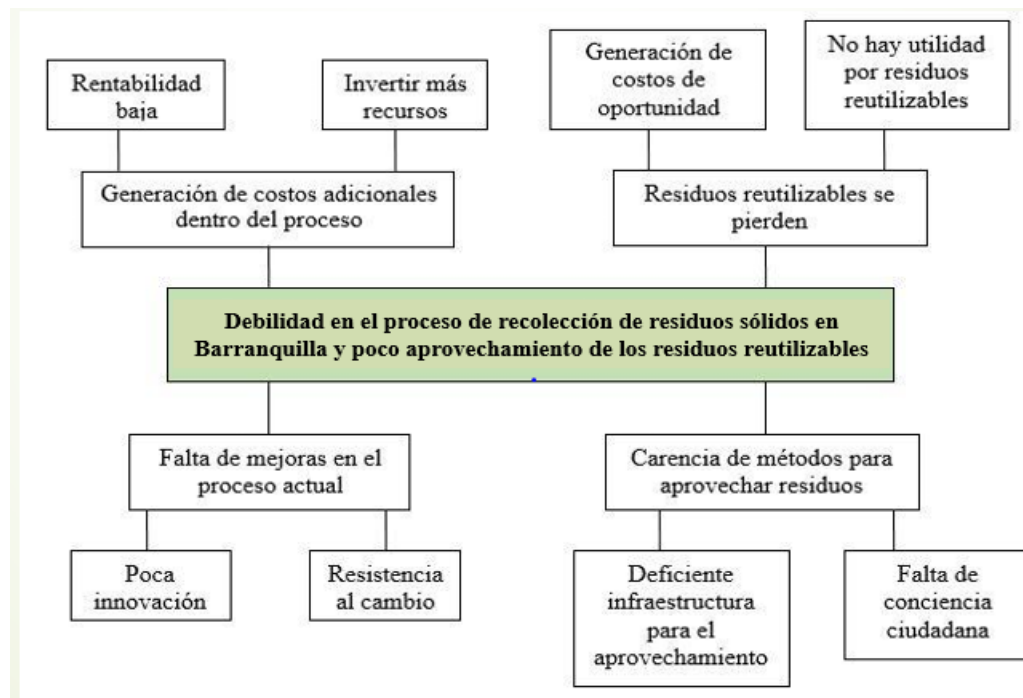
¹ DAMAB: Departamento Administrativo del Medio Ambiente de Barraquilla

Por lo anterior y el análisis hecho en el PGIRS, se tiene como problema central la debilidad en la gestión y manejo de residuos sólidos en la ciudad de Barranquilla, en especial el bajo aprovechamiento de los mismos (Alcaldía de Barranquilla, 2015), donde sus principales causas radican en el desarrollo incompleto del proceso de gestión y la falta de incentivos para promover el aprovechamiento, haciendo latente la posibilidad de ocasionar insatisfacción organizacional y ciudadana por la carencia de algunos servicios como la implementación de rutas selectivas; y la deposición en el relleno sanitario de residuos potencialmente aprovechables (acortando a su vez su vida útil).

En la alta gama de priorización de problemas contemplados en el PGIRS, se relaciona el desaprovechamiento de residuos sólidos susceptibles a ser aprovechados, la descarga de residuos y presencia de agentes contaminantes en vías y espacios públicos, practicas inadecuadas de la población en la generación y manejo de residuos sólidos, falta de cultura y sensibilidad social referente al tema del aprovechamiento de residuos, poca atención, marginalización e informalización del gremio reciclador y poco control de las autoridades ambientales respecto a la disposición inadecuada de los residuos (Alcaldía de Barranquilla, 2015); lo que hace evidente el problema logístico de la ciudad en materia ambiental.

Como manifiesto de las inconsistencias expuestas en el presente planteamiento, se hace una representación a partir de un diagrama de problemas, mostrado a continuación:

Figura 1.



Nota. Elaboración propia 2017.

Siendo el manejo de residuos sólidos en la ciudad de Barranquilla, en especial el proceso logístico de recolección (comprendido desde el usuario) que da lugar al bajo aprovechamiento de los mismos, el problema principal del distrito, las acciones que contribuyen al buen uso de estos ya sea por reducción, reciclaje o reutilización, repercuten con gran impacto en el sistema de gestión de estos, donde la recolección, el transporte y el procesamiento junto con el control final aplicado a las actividades inmersas, constituyen un sistema de costos vital para la mejora en el aprovechamiento de los mismos y en la economía de los entes encargados.

Con base en lo anterior, se hace hincapié en el proceso de recolección por representar entre el 50 y 90% de los costos de un sistema de gestión de residuos (Antonio, Aguilar, Eduardo, &

Zambrano, 2015). Debido a que los costos constituyen un aspecto crucial en el proceso de recolección de residuos y a menudo son ignorados junto con varias actividades de planificación pertinentes a un apropiado sistema de gestión de residuos sólidos, surge el siguiente interrogante:

¿Cómo podría mejorar el proceso de recolección de residuos sólidos domésticos en la ciudad de Barranquilla?

1.2 Justificación

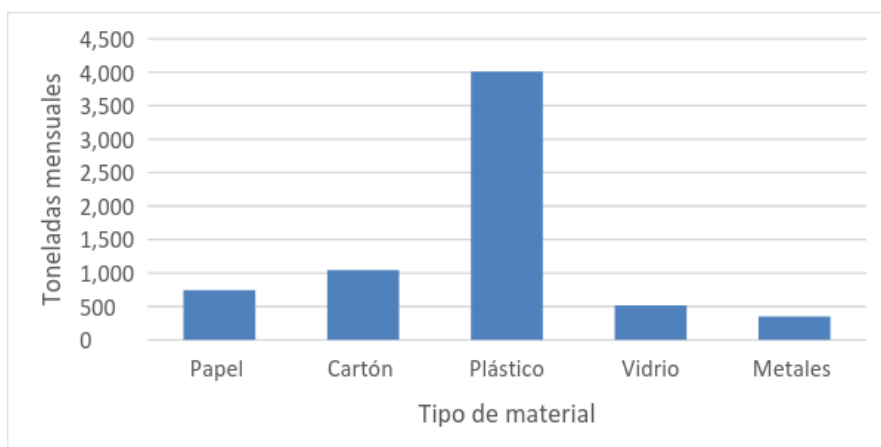
En la actualidad, la mejor manera de hacer más eficiente el proceso de recolección domiciliar en Barranquilla, es que la basura al llegar a la disposición final se encuentre separada, con el fin de identificar el tipo de residuo que hay dentro de las bolsas para hacer más ágil el proceso y reutilizar aquellos residuos que lo permitan, es decir, reducir el desperdicio de material que puede ser aprovechable, enviando solo al relleno sanitario los residuos orgánicos, que para el caso local son aprovechados a partir de la quema de lixiviados producidos por estos.

Sin embargo, el tipo de vehículo que realiza la recolección puede determinarse como condicionante en el proceso, pues si no tiene la capacidad para almacenar la producción de basura por localidad o bien no puede acceder a determinadas zonas por su diseño o tamaño, entonces aumentan los costos logísticos de recolección lo que, en vez de mejorar el proceso de recolección, lo empeora.

En este orden de ideas, la perspectiva que se tiene de los residuos debe cambiar su enfoque y pasar de residuos a recursos, debido a que muchos materiales que terminan en lo profundo de la tierra y vertederos, son reutilizables, reciclables, materia prima en bruto y materia orgánica o generadores de energía.

La figura presentada a continuación se elabora con el fin de presentar las cifras dadas por el PGIRS (2016-2027), referentes a la producción de residuos domiciliarios reutilizables considerados en el presente proyecto, según su tipo en la ciudad de Barranquilla.

Figura 2



Nota. Elaboración propia 2017.

A partir del gráfico anterior, se puede inferir que grandes cantidades de residuos aún siguen siendo desaprovechadas y enviadas al relleno sanitario.

En términos económicos, resulta rentable recuperar el gran valor que pueden generar los residuos. Es por ello que uno de los aspectos más influyentes en la recuperación de los materiales, es su sistema de recolección. De la eficiencia de este proceso, dependerá que los residuos recolectados puedan ser reciclados o reutilizados. Un sistema de recolección que establezca una correcta separación en la fuente permite que los materiales preserven su valor intrínseco para el reciclado y recuperación. De esta forma, es posible evitar que se contaminen otros residuos que todavía tiene un valor económico.

Desde el punto de vista ambiental, los recursos naturales serán mayormente preservados ya que los residuos sólidos se convertirán en una fuente de material aprovechable. Por otro lado, no tener un sistema de recolección de residuos apropiado puede generar un grave impacto en las comunidades aledañas, por la alteración de los recursos: aire, aguas superficiales y subterráneas, y el suelo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar una propuesta de mejora para el proceso de recolección de residuos sólidos domésticos en la ciudad de Barranquilla.

1.3.2 Objetivos específicos

- Construir el diagnóstico del proceso actual de recolección de residuos sólidos en la ciudad de Barranquilla.
- Generar un escenario de recolección de residuos sólidos basado en la clasificación de los mismos en la fuente.
- Diseñar un modelo de costos que evalúe los escenarios planteados con relación al proceso de recolección de residuos sólidos.
- Plantear estrategias de mejoramiento en el proceso de recolección de residuos sólidos.

1.4 Metodología propuesta

Inicialmente se realizó una revisión literaria que incluyó libros y artículos científicos para conocer los métodos de recolección de residuos empleados en la ciudad de Barranquilla que faciliten la caracterización del modelo. Dentro de esta revisión se encontró información demográfica, sociocultural de la ciudad, así como las características y comportamientos más relevantes del sistema de recolección de residuos actual.

Con la información levantada se procedió a definir los parámetros y/o componentes que contendrá la estructura del modelo propuesto, dentro de la estructura se deben definir los parámetros de entrada, los que afectan los costos y las utilidades.

Una vez definida la estructura del modelo propuesto se propone aplicarlo para generar el escenario actual que representa el comportamiento del proceso de recolección domiciliaria llevado a cabo en la ciudad. A partir de este, se generarán otros escenarios de prueba basados en estrategias que mejoren u optimicen el proceso de recolección, ya sea por la reducción de costos, aumento de las utilidades o ambas.

Finalmente, en los resultados se hace el análisis comparativo de los escenarios propuestos basándose en dos indicadores que son: el costo y la utilidad, donde el escenario que posea el menor costo y la mayor utilidad será considerado como aquel que optimiza el proceso de recolección domiciliaria actual.

Capítulo 2: marco referencial

2.1 Marco teórico

2.1.1 Logística

Con el pasar de los años el concepto de logística ha tenido una evolución a grandes pasos que ha llevado a denotar su importancia en distintas áreas y sectores para la ejecución eficiente de los procesos que conforman toda la cadena suministros, involucrando a las partes interesadas desde el inicio o suministro de insumos o materia prima hasta la entrega al consumidor final (Argueta et al., 2015). Incluso, la presencia de la logística es tan amplia que ha aportado a una de las problemáticas latentes en el siglo XXI: El cuidado ambiental, trayendo consigo la logística inversa, la logística sostenible y demás prácticas asociadas a ella que han permitido su integridad con demás áreas para la organización sistemática de sus procesos desde sus inicios hasta el final.

Por lo anterior, distintos autores han aportado definiciones de la logística, donde muchas de ellas han nutrido la literatura no solo por los campos y magnitud que engloban en sus definiciones sino también por las interpretaciones que le han dado algunos sectores al momento de aplicarlas, llevando el mismo a un punto de alta eficiencia en las distintas áreas y departamentos empresariales. Un ejemplo de esos autores es:

Martin Cristopher (1999) quien define la logística en su libro Logística. Aspectos Administrativos como: “El proceso de administrar estratégicamente la adquisición, traslado y almacenamiento de materiales, partes y productos terminados de los proveedores a través de la organización y sus canales de comercialización”.

Ronald H. Ballou (2008) “Todo movimiento y almacenamiento que facilite el flujo de productos desde el punto de compra de los materiales hasta el punto de consumo, así como los flujos de información que se ponen en marcha, con el fin de dar al consumidor el nivel de servicio adecuado a un costo razonable.”

Rafael Antonio Muñoz Aguilar y Santiago Roldan Zuluaga (2016) afirman que: “la logística ha dejado de ser una mera instrumentalización operativa de procesos de abastecimiento o distribución (en toda la cadena), para convertirse en parte activa de las estrategias de posicionamiento comercial de las empresas, además de ser un elemento fundamental para la reducción de costos en la estructura tecnológica del sector productivo ”.

Junto con ellos, son numerosos autores e instituciones que han dado aporte a la definición de la logística que avanza de manera continua cada día. Cabe mencionar que al igual que ellos, han sido muchos los que han desarrollado igualmente literatura para el caso de la logística inversa, logística empresarial, logística sostenible, entre otras divisiones para el área logística.

Es importante mencionar, que el proceso logístico alcanza su mayor rendimiento cuando las actividades individuales, independientemente de las limitaciones que puedan existir entre departamentos, se acoplen entre sí con el fin de alcanzar los objetivos globales concebidos desde la perspectiva de la satisfacción al cliente y la responsabilidad de cumplir en los distintos entornos por parte de las organizaciones empresariales. (Maquera, 2012)

Para lograr una correcta integración de las actividades que constituyen la cadena de suministro (Badenes, 2014), es necesario una adecuada gestión de la misma, donde se organice todo el proceso desde la extracción de materias primas hasta la entrega del producto terminado al cliente en el lugar apropiado, el momento oportuno y en el modo adecuado (véase la figura 1).

En caso contrario, conlleva a un aumento significativo en los costos totales, lo que en el peor de los casos comprometería la rentabilidad de la organización. (Badenes, 2014)

Dentro de las actividades que constituyen la cadena de suministro se encuentra el aprovisionamiento de materias primas donde los proveedores le suministran los insumos a las empresas para que lleven a cabo la producción, seguidamente son almacenados hasta que sean solicitados por una orden de producción; una vez el producto esté terminado se almacena a la espera de ser transportado a los minoristas o consumidores dependiendo de la política de venta de la organización. De ahí, la importancia de completar dicho ciclo, porque cuando los productos de interés comercial son adquiridos, ¿qué pasa después?, ¿qué hacer con los desechos? (subproductos no deseados del proceso productivo).

En este orden de ideas, la logística maneja el flujo de dos elementos fundamentales, siendo uno la información y el otro los productos o servicios propios de la cadena, a través de los cuales se procura crear un flujo efectivo que le permita a las organizaciones ser más competitivas. No obstante, a causa de la globalización ha sido necesario fortalecer la interrelación entre cada una de las áreas de la empresa para afianzar las estrategias planteadas en esta, y por ende el flujo óptimo de recursos presentes en ella (Erik Sandberg, 2011). Lo anterior reflejándose desde las empresas mayoristas hasta los minoristas, por la importancia de la relación entre estos y los proveedores. *“often in close collaboration with logistics service providers, have become a common practice for many retail companies”* (Soto Zuluaga, Thiell, & Colomé Perales, 2017)

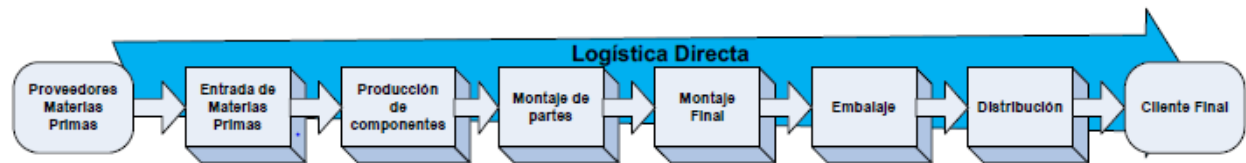
La tecnología ha sido también una disciplina pujante para el desarrollo logístico, influyendo de manera significativa en la respuesta dada a los clientes, en la planeación y demás escenarios de la cadena, por ello se afirma: *“further cost improvements in terms of*

rationalisation and speed in operations are expected as a result of technology” (Sandberg, 2011, p.8). de igual forma se plantea que: *“technology is debated as an enabler for expansion and growth operations that support customer loyalty and profiling – here technology is an important tool for further vertical integration where retailers can better connect their products and needs to the suppliers”* (Zuluaga et al., 2017, p.5). de esta forma se da a conocer la tecnología como una herramienta clave para mejorar la comunicación de los diferentes elementos de la cadena y sus procesos (Ustundag & Tanyas, 2009).

La logística ha empezado a verse como un arma competitiva en donde su adecuada aplicación podría conllevar a unos beneficios económicos dentro de la empresa, este enfoque es explicado así: *“logistics has become a major competitive weapon, but only for those companies who can manage it. It is argued that the share of logistics related costs such as inventory carrying costs, and transportation costs in relation to total costs”* (Prumper et al., 2007, p.4; Schommer et al., 2005, p.10). por ello la gestión de la logística es catalogada como un elemento fundamental para la constitución de una empresa competitiva, tanto así que hoy por hoy muchas empresas tienden a tercerizar estos servicios.

Una vez considerados los planteamientos hechos para la logística a nivel general, se puede catalogar para el ciclo de la logística un flujo directo y uno inverso como lo plantea (Badenes, 2014), de ahí a entrar hacer énfasis en lo que se denomina logística inversa. Para una comprensión de las partes inmersas en el flujo directo véase la figura 3.

Figura 3.



Nota. Elaborado por: O. Badenes. Logística Inversa. Universidad Politécnica de Valencia. 2012

En lo anteriormente planteado, se dan a conocer algunos planteamientos y tendencias propuestas por autores a nivel internacional que enfocan a la logística a nivel macro e íntegro de toda la empresa.

Cabe resaltar, que la logística está presente igualmente en el mercado, debido a la estrecha relación que guardan entre sí, como lo es la planeación de la cantidad de productos a producir de acuerdo al ajuste de la demanda, en donde se obtienen órdenes de producción óptimas permitiendo la reducción de costos en inventarios; esto se puede inferir de la afirmación dada por el profesor Rafael posada y la profesora Salomé Soto en el artículo “El otro lado de la logística, una visión estratégica: tendencias del aprovisionamiento en las cadenas de valor para el desarrollo sostenible” diciendo Rascon, O. Posada & A., 2012:

Los cuatro prioridades o dimensiones u objetivos competitivos básicos: costos, calidad, plazo de entrega y flexibilidad, que ayudan a la empresa a mejorar la flexibilidad configurando una red de aprovisionamiento, por lo que la planificación de requerimientos de material (PRM) se podría considerar vital, ya que todos los cálculos de requerimientos se basan en un plan maestro de producción, que a su vez deriva de previsiones de demanda. (Rascon, O. Posada & A., 2012, p.5)

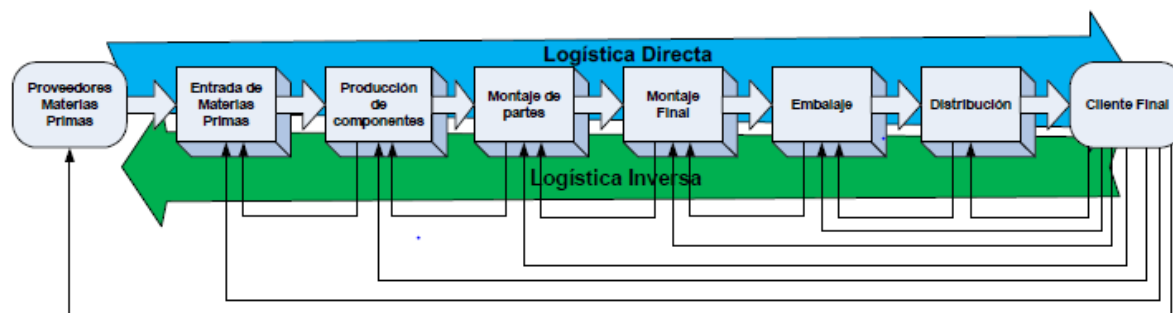
No obstante, en algunos casos los tamaños de las órdenes de producción se basan en pronósticos de mediano o largo plazo, estas son grandes y variables, generando altos costos de

inventario, pero este costo se compensa por las economías de escala del producto a producir (Bowersox, Closs, & Stank, 2000).

2.1.2 Logística Inversa

La necesidad latente de continuar el ciclo del proceso logístico una vez se entrega el producto al consumidor final, es cada vez más fuerte en cada uno de los sectores de la industria, por la optimización de costos que trae consigo la continuidad de esta cadena y la sostenibilidad empresarial. Según (Badenes, 2014) la logística inversa es parte de una tendencia denominada “la cadena del suministro inversa”, donde las empresas ofertantes están diseñando procesos eficaces para reusar sus productos una vez cumplan su vida útil.

Figura 4.



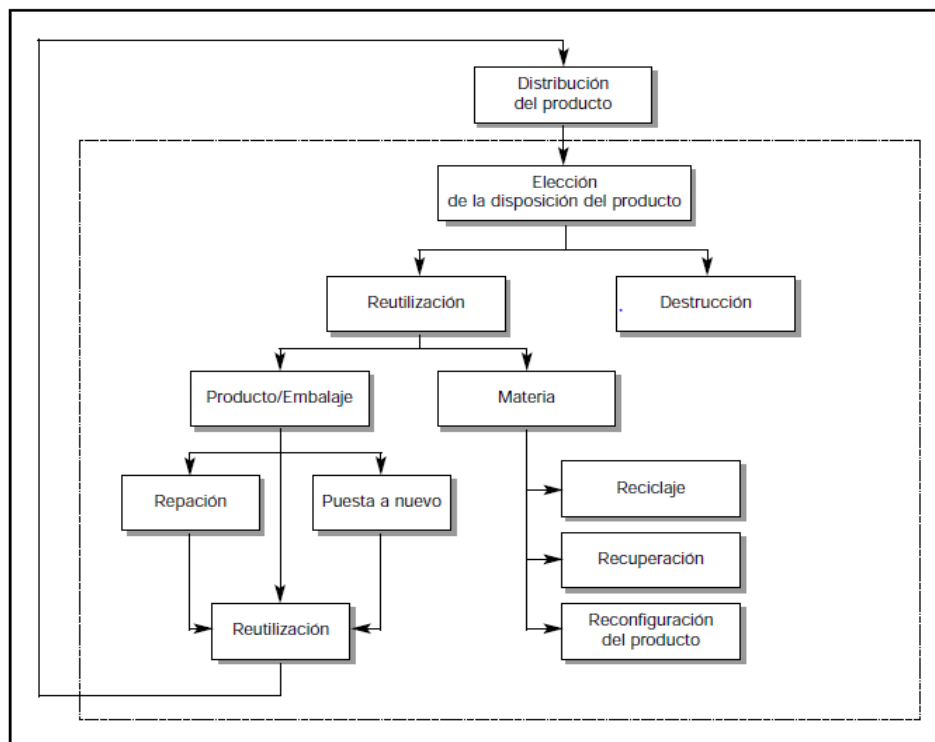
Nota. Elaborado por: O. Badenes. Logística Inversa. Universidad Politécnica de Valencia. 2012

Como se observa en la figura anterior, el cliente final es parte esencial en el flujo inverso, dado a que este es el origen de todo el flujo, evidenciando que, si no tiene pleno conocimiento de cómo llevar a cabo sus acciones para el reverso en la cadena, muy difícilmente pudiese existir un flujo adecuada de la misma.

Cabe mencionar, que la logística inversa ha tenido mayor auge en los últimos años, debido a la responsabilidad ambiental exigida a las empresas y por el análisis económico hecho por estas

al momento de reutilizar los productos desechados, la disminución en muchos de los costos de producción es notable (Vázquez, 2004), además de aportar y cumplir con la recolección de los distintos tipos de residuos que afectan al medio y por supuesto constituyen el flujo inverso necesario en las empresas.

Figura 5.



Nota. Elaborado por: J. Feal. Logística Inversa. 2004.

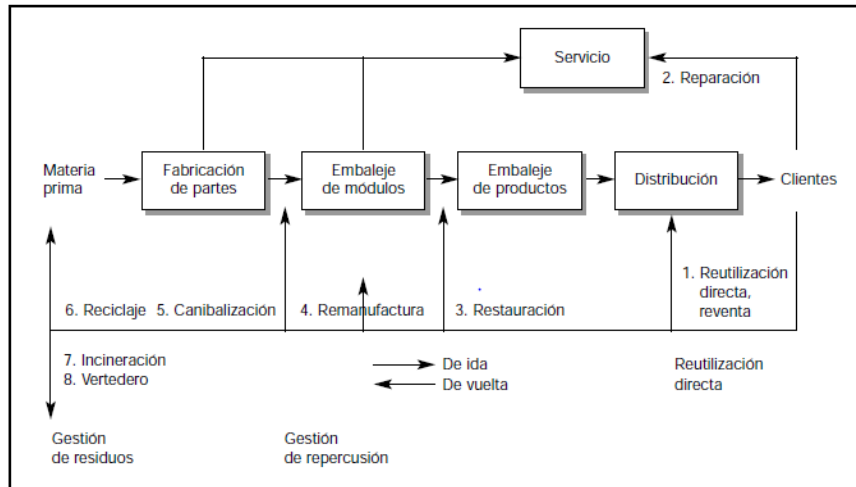
Teniendo en cuenta el análisis hecho por Feal en su artículo “las actividades de la logística inversa representan un sector en auge aún por descubrir” al mencionar los posibles procesos por los cuales se puede llevar a cabo el flujo inverso, que no necesariamente debe ser por el desechos de los mismo al cumplir su ciclo de vida sino por procesos de devolución a través de los canales de distribución (ver figura 5), se determina que el objetivo principal de este flujo es recibir la

mayor retribución de los bienes de acuerdo a la normativa legal o con la mejor disminución de costos (Ver figura 7). De ahí, tener como criterio para su recuperación: calidad de los materiales que conforman el producto, costos implicados en su proceso de fabricación, consecuencias para el medio ambiente, entre otros.

Los canales de distribución son vitales debido a la importancia de estos en la etapa de surgimiento de las cadenas inversas; de estos resultados surgieron modelos que permitieron aportar al diseño de la cadena de suministros usando los canales por la relación guardada con los ofertantes principales. Por ejemplo, Ginter y Starling (1978) presentan un modelo genérico para los canales de distribución de forma inversa, en donde los principales actores son el consumidor y el productor para el reciclaje de residuos.

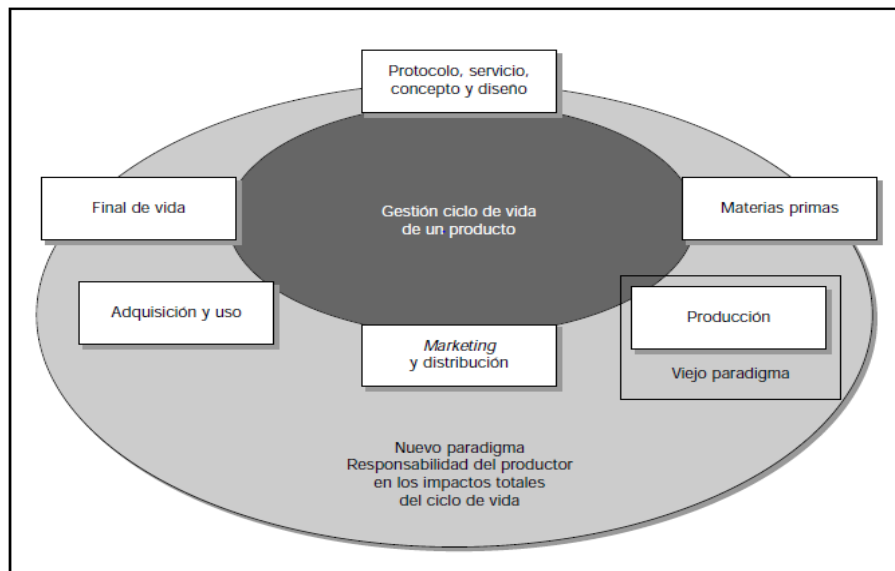
La logística inversa puede tener un enfoque tan amplio que determina no solo la cadena del retorno para los productos, sino que puede adelantarse a la finalización del ciclo de vida del producto a fin de tener mejor gestión al momento de dar salida del mercado a estos. Por ello la determinación de las siguientes actividades al disponer el producto: reparación (menor calidad que los nuevos productos), renovación (proporcionar una calidad específica), reciclaje (recuperación para ser utilizado de nuevo), reutilización parcial (recuperación de una parte del material usado), reutilización directa (sin ninguna transformación de importancia), destrucción del producto, venta a un tercero y vertido o disposición final (no reutilización de forma alguna). Esta descripción de los procesos puede verse de manera gráfica en la figura 6. (Rubio Lacoba, 2003; Vázquez, 2004)

Figura 6.



Nota. Elaborado por: J. Feal. Logística Inversa. 2004.

Figura 7.



Nota. Elaborado por: J. Feal. Logística Inversa. 2004.

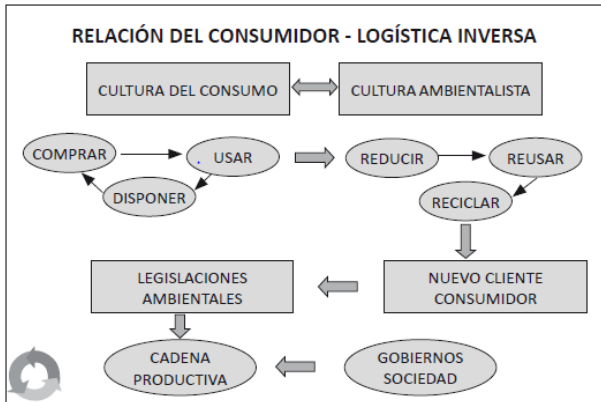
Al haber analizado algunos de los escenarios presentes en la cadena de suministros donde se incluye el flujo inverso, se puede notar que este en un ciclo cerrado en donde todos los actores

son esenciales para cumplir con el objetivo principal de la empresa y de ambos flujos logísticos. Sin embargo, existen distintos tipos de redes logísticas (Fleischmann, Krikke, Dekker, & Flapper, 2000) para la recuperación económica de los residuos debido a que está ligada al sector económico que se trate y por ende al producto inmerso en la misma, por ello el diseño de las cadenas de suministro debe estar hecho a la medida de cada empresa. Entre las redes se destacan: para el reciclaje, para la refabricación y para la reutilización.

Las redes logísticas de reciclaje son aquellas estructuras simples, caracterizadas por requerir grandes entradas de productos en el flujo inverso y porque el valor unitarios de los productos presentes en esta red son bajos (Rubio Lacoba, 2003); la red de refabricación consisten en obtener todas las partes del producto con alto valor agregado y por ende por ser los fabricante en la mayoría de casos quienes conocen de mejor manera las partes que conforman el producto, son los responsables directos del diseño de la cadena inversa, por ende, la red guarda estrecha relación con el flujo directo de la cadena; la red de reutilización entre todas las redes es la que mayor costos representa en el área del transporte, además para el ingreso de material a esta red deben estar en condiciones para su post proceso, como limpieza, mantenimiento y demás aspectos que afectan sus características.

Como síntesis de los diferentes tipos de redes logísticas inversa que pueden existir se puede mostrar de manera gráfica (véase figura 8) la relación entre consumidor y el productor, a fin de evidenciar el efecto de ella sobre los demás procesos logísticos vinculados directamente al inicio del flujo inverso:

Figura 8.



Nota. Elaborado por: G. Maquera. Logística Verde e Inversa. 2012

Al haber analizado los distintos procesos presentes tanto en la logística como flujo directo e inverso, se pueden establecer diferencias (Maquera, 2012), tanto en sus actividades como en materia de costos, se muestran en la siguiente figura:

Figura 9.

FLUJO DIRECTO	FLUJO INVERSO
<ul style="list-style-type: none">Recursos para la estimación de la demanda.Transporte de un punto a muchos puntos.Precio uniforme.Costos claros y monitoreados por sistemas de contabilidad.Gestión de inventarios.Métodos de marketing bien conocidos.	<ul style="list-style-type: none">Imposibilidad en la estimación de la demanda.Transporte de varios puntos a un punto.Precio no uniforme.Costos menos visibles y pocas veces contabilizados.Gestión de inventarios más compleja.Métodos de marketing más complejos.

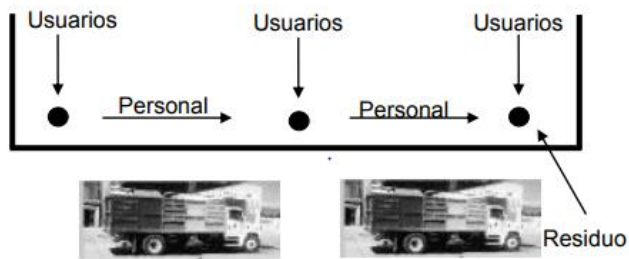
Nota. Elaborado por: G. Maquera. Logística Verde e Inversa. 2012.

2.1.2 Métodos de recolección

Los métodos de recolección de residuos sólidos domiciliarios en el caso urbano varían según las políticas dadas por el ente encargado de tal actividad y por las condiciones geográficas bajo las cuales se encuentre la comunidad usuaria del residuo, pero es claro que este método consiste en el acercamiento que tiene la empresa prestadora del servicio con cada uno de los usuarios para hacer la respectiva recogida de los mismos. Estos pueden ser recogidos mezclados o separados, según las políticas existentes, para el caso de la ciudad de Barranquilla, la disposición de los residuos sólidos domiciliarios se hace mezclada sin discriminar ningún tipo de residuo. Cabe resaltar, (McDougall, White, Franke, & Hindle, 2008) que la manera en como estén dispuestos los residuos para su recolección es fundamental para ser transportados hasta el relleno sanitario, debido a que en caso que no se encuentre en una bolsa u otro tipo de elemento que los junte para su transporte no serán recogidos por el recolector.

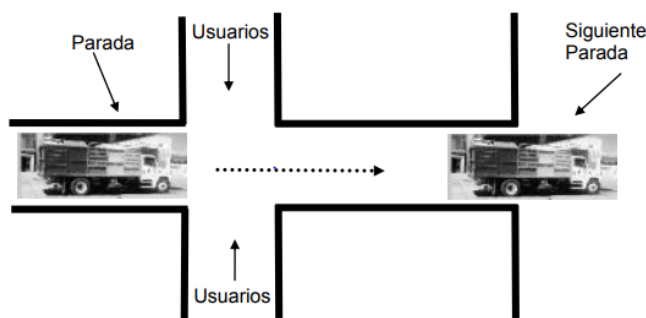
Teniendo en cuenta lo anterior, se pueden definir dos métodos de recolección: Curbside y Drop-off. (Groot et al., 2014). El método Curbside, es la recolección en la acera de cada uno de los domicilios en donde va el personal recolector con el vehículo asignado hacer la respectiva recolección de los residuos dispuestos (ver figura 10). El método Drop-off, es aquel donde se disponen los residuos sólidos en lugares específicos, ubicados de manera estratégica para un número de domicilios estimados, a fin de disponer los mismos, es importante mencionar el acondicionamiento de estos puntos como el buen estado de los contenedores donde son depositados los residuos (ver figura 11). (Márquez, 2011)

Figura 10.



Nota. Elaborado por: J. Márquez. Macro y Micro ruteo de residuos sólidos

Figura 11.



Nota. Elaborado por: J. Márquez. Macro y Micro ruteo de residuos sólidos residenciales. Universidad de Sucre. 2011.

Una vez analizados los dos tipos de métodos de recolección de residuos sólidos empleados, es importante mencionar los costos que implica cada uno de estos métodos, teniendo que el método curbside es el más costoso debido a que gasta mayor combustible, emplea más tiempo para la recolección de los residuos y en ocasiones se limita por el acceso restringido a algunas áreas urbanas, no obstante, brinda una mejor percepción del servicio. Por otro lado, el método Drop-off, es más económico porque hace menos paradas y además el tiempo empleado para la recolección es menor, sin embargo, el mantenimiento de los puntos en donde se disponen los mismos es estricto debido a la cercanía que tienen con la población usuaria y los posibles

problemas paisajísticos, ambientales y de salud que podría traer consigo para la comunidad el descuido de estos. (Gomes, Matos, & Carvalho, 2008).

2.1.3 Tipos de Vehículo utilizados en la recolección de residuos sólidos.

Los tipos de vehículos empleados para la recolección de residuos domiciliaria varía según varios aspectos, como, por ejemplo, la capacidad de los vehículos, la cantidad de basura que recolecta la zona, la tecnología de los vehículos al momento de hacer la recolección entre otros. Por ello a continuación se hace mención de algunos de los tipos de vehículos de recolección usados para la recolección domiciliaria. (Márquez, 2011)

Como lo define Márquez (2011), las volquetas y compactadores para el caso de recolección de residuos domiciliarios, son los vehículos más usados en esta actividad por la amplia capacidad que poseen en para almacenar, de ahí que este mencione los siguientes:

Vehículos con sistemas de contenedor transportado: Estos vehículos son usados frecuentemente para la recolección de residuos generados por el área comercial e industrial debido a la capacidad que poseen para el levantamiento de contenedores de gran capacidad, ya sea para la actividad de carga o descarga de los mismos.

Contenedor remolque: estos camiones son usados para el transporte, carga y descarga de residuos con gran pesaje como la arena, el metal de chatarra, la madera, entre otros. Cabe resaltar, que este tipo de vehículos son generalmente enviados a construcciones y actividades que generan gran volumen pesado de residuos, sin embargo, entre estos muchas veces se encuentran residuos aprovechables como los metales.

Figura 12.



Nota. Elaborado por: J. Márquez. Macro y Micro ruteo de residuos sólidos residenciales. Universidad de Sucre. 2011.

Vehículos Compactadores: Los compactadores son vehículos que aparecen para mitigar el problema de volumen que existe, debido a que los residuos sólidos si bien representan un peso determinado, muchas veces podría pasar que el compactador y el camión no estuvieran trabajando a su máxima capacidad porque los residuos habían ocupado el volumen total de su espacio y no el de su peso. Por ello, estos tienen un sistema con el cual comprimen los residuos recolectados a fin de aumentar el espacio del compactador y usarlo a su máxima capacidad.

Figura 13.

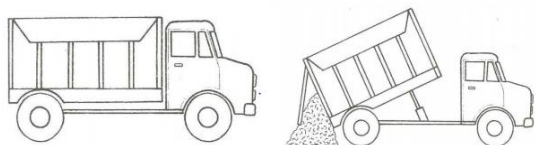


Nota. Elaborado por: J. Márquez. Macro y Micro ruteo de residuos sólidos residenciales. Universidad de Sucre. 2011.

Vehículo recolector de caja abierta: Son usados generalmente para la recolección de pequeñas cantidades de residuos sólidos, debido a que es poca su capacidad de almacenamiento,

no obstante, presentan ventajas como: la recolección de poda de árboles, construcción y residuos voluminosos. Además, su altura, hace compleja el proceso de recolección de residuos.

Figura 14.



Nota. Elaborado por: J. Márquez. Macro y Micro ruteo de residuos sólidos residenciales. Universidad de Sucre. 2011.

Los vehículos mencionados anteriormente, son los más usados para el proceso de recolección de residuos sólidos en el sector domiciliario, aun cuando mucho de ellos tengan mayor aplicabilidad para la recolección de residuos especiales (poda de árboles y de construcción).

2.1.4 Tipos de residuos

Para el caso de la recolección de residuos domiciliarios, la importancia del tipo de residuos desechados es muy importante, debido a que al momento de disponerse, la reutilización o la clasificación de estos es esencial para un mejor proceso de recolección ya sea por su aprovechamiento y generación de utilidades, el alargamiento de vida útil del relleno por la disminución de cantidad de residuos que van a este y por la contribución con el medio ambiente al reutilizar y dar tratamiento a los residuos peligrosos con el ambiente. Por ello, Dahlén & Lagerkvist (2010) clasifican los residuos de la siguiente manera:

Figura 15.

Primary category	Secondary category
Dry recyclables	<i>Newsprint</i>
	<i>Cardboard</i>
	<i>Paper packaging</i>
	<i>Plastic film packaging</i>
	<i>Dense plastic packaging</i>
	<i>Plastic foam packaging</i>
	<i>Glass packaging</i>
	<i>Metal packaging</i>
	<i>Biowaste excluding garden waste</i>
	<i>Garden waste</i>
Biodegradables	
Inorganics	<i>Non-packaging glass</i>
	<i>Non-packaging metal</i>
	<i>Other non-combustibles</i>
Combustibles	<i>Non-packaging paper</i>
	<i>Non-packaging plastic</i>
	<i>Diapers</i>
	<i>Textiles</i>
	<i>Wood</i>
Hazardous waste	<i>Other combustibles</i>
	<i>Electric & electronic equipment</i>
	<i>Other hazardous waste</i>

Nota. Elaborado por: Dahlén & Lagerkvist..

Hacer la anterior clasificación es importante debido a que permite, identificar qué tipo de residuos son los indicados al momento de hacer una clasificación para su reciclaje, de ahí que se identifiquen como se ve en el apartado del diseño propuesto para la recolección de residuos en el presente documento, los tipos de residuos sólidos domiciliarios aprovechables: papel, cartón, plástico, metal y vidrio. (Alcaldía de Barranquilla, 2015).

2.1.5 Problemáticas en el proceso de recolección de residuos

Valentina Gutiérrez y Diana Patricia Jaramillo (2009) afirman que: “la gestión de los inventarios de producto terminado, producto en proceso y materias primas, es uno de los aspectos logísticos más complejos en la industria de producción y distribución de bienes. Una de las estrategias para enfrentar dicha complejidad consiste en la implementación de herramientas informáticas de software”

Una de las tareas que demanda mayor complejidad de carácter táctico y operativo en la cadena de abastecimiento es la toma de decisiones sobre los diferentes tipos de inventario y su

gestión determinante en la eficiencia de los sistemas productivos y de distribución de una empresa (Rubio Lacoba, 2003), para la cual definir sus políticas de inventario ha de ser una decisión que no debe asumirse como una tarea operativa sino como una actividad proveniente de la planeación estratégica de la organización y que debe soportarse por metodologías mucho más evolucionadas, tecnológicas y sofisticadas como softwares que permitan dar soporte a las decisiones sobre políticas de inventario por medio de métodos cuantitativos propios de la ingeniería, con una tendencia fuerte hacia los sistemas ERP.

En Colombia una de las tendencias logísticas está encaminada hacia la implementación de recursos tecnológicos cada vez más eficientes en las cadenas de abastecimiento para gestionar los diferentes tipos de inventarios teniendo en cuenta que las herramientas disponibles en el país presentan fortalezas en conectividad de la información a lo largo de las cadenas de suministro (Córdoba, 2014)

Se ha logrado observar que tras la implementación de las herramientas mencionadas se presentan dificultades para cuantificar el mejoramiento continuo obtenido por los software debido a que la dinámica de las empresas debe ajustarse a ellos y en opinión debería ser totalmente lo contrario, se debería buscar una flexibilidad entre la dinámica de la empresa y el software y además queda abierta y dada la investigación para desarrollar software que permitan calcular en términos de dinero el beneficio obtenido por su uso basados en la oportunidad de apoyar decisiones sobre inventarios por medio de métodos cuantitativos y cualitativos buscando siempre la medición de la eficiencia del sistema en términos de nivel de servicio a clientes externos e internos en términos del costo total.

Lo anterior se expone a fin de considerar la poca inversión hecha en algunos países en materia de investigación para la mejora logística de los procesos de recolección de residuos

(Vázquez, 2004) por las barreras presentes a raíz de la gestión e inversión en el campo investigativo, lo que traería consigo un alto porcentaje de optimización del proceso.

2.2 Estado del arte

Desde los inicios del hombre, la explotación de los recursos naturales ha sido una de las actividades más realizadas por los beneficios que generan los mismos, sea como ayuda directa en la ejecución de tareas cotidianas o por la función que cumplen al ser suministros o insumos en el desarrollo de actividades productivas industriales. La obtención de estos, en sus presentaciones naturales o ya transformadas en bienes y/o servicios es mayor cada día, evidenciando en la población el afán de adquirirlos, usarlos y finalmente desecharlos con el fin de ser cambiados.

En la actualidad, el deseo de compra a nivel mundial es tan intenso como el crecimiento de la población universal, evidenciando la proporcionalidad directa entre estos dos aspectos. El primero, debido al comportamiento consumista y deseo de compra de bienes que finalmente se reduce a comprar, usar, cambiar y/o votar, donde el hombre es el principal responsable de ello; y el segundo, por aumentar la cantidad de los principales actores desarrolladores de las actividades mencionadas. Sin embargo, aunque el consumismo es uno de los problemas enfrentados actualmente, es mayor la inconsistencia generada por todos estos bienes al cumplir su vida útil, es decir, al ser desechados, por el desconocimiento de la población al momento de darles disposición final, evidenciando esta situación en el sector industrial, comercial, domiciliario, y demás áreas donde se realizan actividades generadoras de residuos.

Por tal motivo, se realiza una revisión de posibles escenarios que pueden ser estudiados para un mejor análisis del proceso de recolección de residuos sólidos domésticos, basado en casos de estudios realizados desde la perspectiva nacional e internacional con énfasis en las generalidades y costos logísticos y de la cadena conformada por el desechos de estos para su aprovechamiento:

la logística inversa, lo cual facilitara la caracterización de los mismos a partir de las variables inmersas en la actividad, obteniendo lucidez para un mejor análisis crítico.

2.2.1 Aplicación de la logística inversa e investigación de operaciones en la recolección de residuos sólidos

Garantizar una eficiente recolección de residuos sólidos es un proceso que requiere calidad desde su inicio hasta el final, es decir, una cadena de logística inversa completa, teniendo en cuenta la importancia para la óptima disposición, tratamiento y aprovechamiento de los residuos. La preocupación ambiental y la responsabilidad social, no solo acoge a las organizaciones responsables de diseñar tal cadena sino a toda la población universal, invitándola a participar en la retribución de cada uno de los residuos generados, aportando significativamente en la reutilización, reciclaje y disposición final adecuada de los mismos, resaltando que la mejor ruta de regreso de los residuos a su reprocesamiento, es una de las decisiones más importante que dan garantía al éxito de la logística inversa (Agrawal, Singh, & Murtaza, 2016), por integrar a todos como partes interesadas del proceso y por los beneficios económicos que brinda reutilizar y organizar las etapa del proceso inverso de los mismos.

No obstante, el anterior planteamiento aunque resalta responsabilidad para las organizaciones encargadas de diseñar la cadena en reversa y para el consumidor final (actor esencial para la optimización de los recursos destinados a la actividad), es importante mencionar la participación del gobierno y el estado como garantía en el desarrollo de procesos de reciclaje y prácticas que generen mejoras tanto en los costos de la operación, como en la eficiencia de la misma; de ahí que comunidades como la unión europea tenga interés en desarrollar legislación para el apoyo y logro del reciclado de determinados residuos domésticos municipales (Bing et al., 2016). Por ello, en caso de funcionar como se dicta desde el área legislativa, se sujeta el

proceso logístico a inversión en tecnología y procesos por parte de las organizaciones encargadas de la operación, que permitan tratar adecuadamente la entidad objeto de estudio para el proceso tratado.

En Latinoamérica, países como Brasil han puesto en manifiesto políticas nacionales de residuos, donde se hace necesario el diseño e implementación de redes de logística inversa para distintos residuos, como por ejemplo los electrónicos (Guarnieri, e Silva, & Levino, 2016), dando ejemplo a todos aquellos países en vía de desarrollo, al mostrar la cadena inversa conformada no solo por los planes de gestión y clientes internos de las organizaciones, sino de todos los actores presentes en la misma, enfocando a los clientes finales, los cuales cumplen el papel catalizador para el inicio de reversa de los residuos o desechos desde la fuente. (Bing et al., 2016; Guarnieri et al., 2016).

Desde el campo de la investigación de operaciones, el diseño de modelos de optimización multi-objetivos permite la implementación de redes logísticas inversas sostenibles, donde se tratan integralmente factores como, la sostenibilidad económica a partir de la optimización de costos, el impacto ambiental y la responsabilidad social (Govindan, Paam, & Abtahi, 2016) centrando por el uso de sus herramientas un escenario competente, de exigencia e intercambio de intereses por parte del cliente interno y externo, donde el multicriterio de toma de decisiones a raíz del planteamiento, evaluación y priorización de las variables de selección permitan el funcionamiento de redes inversas para una solución ideal, con el fin de generar lazos de asociación con agentes que generen contribución significativa en el diseño de la cadena y solidez de los modelos. (Prakash & Barua, 2016)

El estudio con foco en los residuos domiciliarios o domésticos, se aborda desde la logística como una herramienta moderna para este antiguo problema, (Rojas, Salazar, Sepúlveda,

Sepúlveda, & M Santelices, 2006) donde se piensa en hacer crecer su economía desde el desarrollo sostenible, específicamente en la relación logística inversa-Medio ambiente, es decir, al tener conciencia del desarrollo de actividades bajo la relación producción-economía, haciendo de ello un proceso integral de los factores mencionados y el aprovechamiento de los mismos, actividad que resulta eficiente por el retorno económico de estos y aun mayor para los países con grandes volúmenes de residuos como el caso de Colombia.

Adicionalmente, el enrutamiento es uno de los temas asociados a la buena planificación que tengan las recolectoras de residuos sólidos, porque pueden dar mejora en los procesos por la optimización de recursos como distancia, tiempo, mano de obra y demás aspectos reflejados en los costos de la empresa. De ahí que, el ruteo y la ubicación de enrutamiento jueguen un papel fundamental en la mejora de esta actividad. Investigaciones realizadas (Prodhon & Prins, 2014) traen conocimiento de técnicas para la resolución de dichas situaciones, donde el proceso de metaheurísticas es uno de los más usados, mostrando la importancia del enrutamiento en el proceso logístico del transporte, que en algunos casos tienen lugar a ser tratados con procesos dinámicos o estocásticos y el modelado de situaciones.

El proceso de recolección de residuos, es la etapa que más afectaciones puede tener en la recuperación de los mismos para su posterior manipulación, debido a que este representa en la parte económica global del servicio, entre el 50 y 90% de los costos asociados a este (Antonio et al., 2015). En el caso estudio de Antonio et al. (2015) por medio del uso de programación y metaheurísticas, pudo optimizar las rutas de recolección y la cantidad de residuos recolectados en dos localidades de la ciudad de México en un 40% más que el proceso de referencia, apoyándose en la representación gráfica de las localidades estudiadas, factor esencial para determinar las rutas más propicias, porque aun cuando la programación pueda optimizar la operación en

porcentajes considerables, la estructura de las rutas es vital al momento de conocer las distancias en el proceso por los recursos empleados en el mismo, como el tamaño de los camiones, el método empleado (curbside o drop-off), entre otros.

Para finalizar la revisión literaria en el marco de la investigación de operaciones y la logística, cabe resaltar que en muchos países la solución a la disminución de costos del proceso de recolección de residuos se obtiene por soluciones estratégicas como el diseño de algoritmos genéticos que optimicen el recorrido de las rutas hasta un centro de acopio o estaciones de transferencia, localizados por la ayuda de herramientas que contribuyen a la óptima ubicación, como los modelos multi-objetivos (Salvador et al., 2015), siendo decisiones y propuestas completas para el tratamiento y aprovechamiento de residuos. No obstante, buscar soluciones de raíz resulta más ventajoso y genera mayor optimización en los sistemas diseñados, aunque el grado de dificultad aumente por ser la parte social una de las más complejas al momento de culturizar y educar para el caso de la recolección de residuos.

La buena gestión de residuos desde la fuente contribuye significativamente a la reducción de costos de las empresas encargadas de esta labor, debido a la tasa de retorno que se tiene por el aprovechamiento de los mismos y la mejora en el desarrollo sostenible.

2.2.2 Escenarios para el estudio de los costos presentes en el proceso de recolección de residuos sólidos urbanos y domésticos

Una vez estudiados los procesos que representan ventaja para el universo en general integrando y equilibrando las distintas etapas compactas en la cadena de suministros diaria en cualquier sector económico y núcleo de la sociedad, al hacer una adecuada disposición de los residuos sólidos (resultado de la producción y actividades de ellas), cabe resaltar, dos aspectos importantes que impulsan a las organizaciones y sociedades en general a implementar la buena

práctica de recolección, clasificación y reciclaje de residuos: los costos que implica desempeñar esta actividad y la repercusión en la economía de las partes que conforman la red. De ahí, el interés de analizar los factores que determinan los costos de la recolección de residuos sólidos.

En Italia, el estudio de una muestra de sus municipios (Greco, Allegrini, Del Lungo, Gori Savellini, & Gabellini, 2014), estimó los costos de recolección para residuos: papel y cartón, materiales múltiples (vidrio, plástico, metal), los residuos orgánicos indiferenciados y residuales. Resaltando, que estos difieren según su tipo por el tratamiento que debe sufrir cada uno, además de verse afectados por el tamaño y densidad de la población, el porcentaje de recogida selectiva, el porcentaje de recolección para el hogar y la prestación privada.

Teniendo en cuenta lo anterior, como resultado se tiene que la recogida indiferenciada de residuos para la muestra de municipios estudiados, tiene mayor ventaja de costos cuando la cantidad recogida aumenta, mientras que la recogida selectiva de residuos tiene costos más altos y bajas economías de escala. Por tanto, proponen para la mejora de la última forma, innovación en el método de recogida, la ubicación de los puntos de recolección, frecuencia de este, incentivar a los factores externos por el medio económico y a los internos con un control más riguroso de planificación llevado a cabo por medio de la caracterización de los procesos y evidencia del comportamiento en el país en este proceso.

Por otro lado, en España (Bel & Fageda, 2010) se realizó un análisis empírico de los costos de la gestión de residuos sólidos enfocado en Galicia, donde indica que la cooperación entre municipios para el proceso de recolección de residuos y disposición por la parte usuaria de los mismos se puede ver reflejada en un ahorro de costos por la estandarización de las actividades. Además, relaciona la gestión de la actividad por parte del sector privado y público, donde el

primero es más económico que el segundo y recalca que la disposición de un volumen total de residuos para la actividad de reciclaje no implica mayores costos.

Teniendo en cuenta, que el gobierno desempeña un papel con alta incidencia en la generación de buenas prácticas ambientales, las decisiones tomadas por este repercute en todo el sistema del estado que este siendo caso de estudio, dado a que en culturas desarrolladas se transfiere del sector público al privado las actividades de recolección de residuos, con el fin de buscar la eficiencia en los costos, como lo ocurrido en la región flamenca de Bélgica (Jacobsen, Buysse, & Gellynck, 2013) al comparar costos de los residuos domésticos entre la recolección privada y pública por medio del levantamiento de información demográfica e indicadores, alcanzando a tener una idea aproximada que el costo de servicio privado es menor que el de las funciones de carácter público de los residuos.

Los incentivos por la actividad de reciclaje es una buena opción para invitar a la comunidad apoyar la labor. Prácticas que deben generarse en ambientes donde no exista la cultura de separación de residuos domésticos para motivar a las personas que conformen el núcleo de la población hacerlo, por ello en China (Wang, Dong, & Yin, 2016) se aplicó la herramienta del comportamiento planificado, encontrando que la recogida clasificada de los residuos se ve influenciada por el entorno, es decir, si este participa o no de la misma. Resaltando a su vez, el resultado final obtenido por esta actividad junto a las políticas que rigen el mismo desde el punto de vista económico. Incentivos como bonos para la toma del transporte público por kilos de basura recolectada, lo cual no solo contribuye al problema ambiental sino al flujo vehicular, como lo hizo la ciudad Curitiba en Brasil, demostrando una vez más que la tarea tiene solución en un sistema que integra partes vitales del estado: sector productivo y sociedad. (Jacobsen et al., 2013; Rojas et al., 2006; Wang et al., 2016)

La planificación del proceso de recolección y gestión adecuada de los residuos sólidos, van relacionados de la cantidad de residuos producidos y la recolección clasificada de los mismos, aspectos que permiten plantear indicadores para la evaluación de zonas según las condiciones territoriales que rigen las mismas, donde existe una relación en el área rural, la cual genera una cantidad de residuos que no puede ser subestimada al momento de establecer un plan de gestión para el aprovechamiento de los mismos. (Passarini, Vassura, Monti, Morselli, & Villani, 2011)

Los países en Europa, son uno de los más desarrollados al momento de implementar sistemas basados en buenas técnicas para la planificación e integral manejo de residuos sólidos, enmarcando sus prácticas a nuevas concepciones del desarrollo sostenible a nivel mundial y satisfacción a la población. Por ende, la búsqueda en tener mejores sistemas logísticos en el proceso de recolección y gestión promueven el estudio constante en varias de sus regiones (Pires, Martinho, & Chang, 2011) donde en su región central es necesaria la integración de sus tecnología con los sistemas propuestos.

En cuanto a las políticas de producción de los usuarios y las políticas de integración de modelos ambientales, en Portugal y Malasia respectivamente, se desarrollan estrategias que repercuten en la mejora del rendimiento de los mismos (recolección de los residuos), específicamente en la etapa para su disposición final, con el fin de garantizar aprovechamiento de los mismos. (Niza, Santos, Costa, Ribeiro, & Ferrão, 2014; Victor & Agamuthu, 2013)

Teniendo en cuenta las ventajas de la implementación de prácticas de separación en la fuente de residuos sólidos para su disposición final, se resalta la intensificación de los sistemas que pueden ser aplicados a la sociedad a fin de evaluar su comportamiento en un periodo de tiempo y los costos de la práctica, por ejemplo en Inglaterra (Shearer, Gatersleben, Morse, Smyth, & Hunt, 2016) donde la implementación de calcomanías referentes a la clasificación de residuos en los

recipientes de disposición final en determinadas comunidades, incremento la practica en los hogares, evaluación hecha por 16 semanas (incluido tiempo de evaluación), persistiendo el comportamiento a largo plazo y manifestando a los entes encargados de tal actividad para su implementación, debido a que el costo por hogar fue de 0,35 euros (33000 hogares evaluados).

De igual forma, el manejo de sistemas logísticos planificados para la gestión clasificada de residuos sólidos urbanos al tener presente el ciclo de vida de los mismos, permite el diseño de actividades que potencializan la recolección ya clasificada considerando la cuantificación y el análisis de estos por medio de etapas y subetapas (Iriarte et al., 2009) como en las zonas urbanas densas, donde la distancia entre ciudades y sistemas de recolección de neumáticos móvil, el multi-envase y el puerta a puerta o acera, son esenciales para el desempeño apropiado de los sistemas.

2.2.3 Método de recolección de residuos domésticos Curbside o en la acera

El método de recolección de residuos curbside, es hasta el momento la manera en cómo se obtienen los desechos para su disposición final en la mayoría de las ciudades del estado colombiano. Como su nombre lo indica, consiste en recolectado de los residuos en la acera, es decir, como se aprecia localmente la prestación del servicio de recolección por parte de los camiones encargados de llevarlos hasta su sitio final, desde la acera o frente de cada uno de los hogares (para el contexto de residuos domiciliarios).

Curbside es implementado para la limpieza o recolección de residuos en carreteras o autopistas, lo que permite la realización de estudios en el área urbana y suburbana que relacionan a su vez sistemas de recolección en la acera para el reciclaje residencial, (Wagner & Broaddus, 2016) los que constan de la implementación de contenedores por un periodo de tiempo, permitiendo sentar su base en un costo estimado de la limpieza, la recogida de basura y para los

casos en que no sean aplicados este tipo de contenedores la pérdida de ingresos por falta de reciclaje; que en muchos casos se acompañan con el diseño de sistemas de recolección selectiva a base incentivos para los usuarios del sistema. Ahora, el costo de la deposición de basura va en función de la densidad poblacional, el costo de la mano de obra, condiciones de la superficie o geográficas para el casco urbano objeto de recolección, y el costo del equipo de necesario para su recolección.

Cabe resaltar, que los costos de este método se pueden ver reflejados en el tiempo de las rutas para la recolección curbside de residuos reciclables (Everett, Maratha, Dorairaj, & Riley, 1998) siendo más altos debido a los costos inherentes asociados a la operación logística que aparte de los costos de transporte, el tiempo es tardío por la clasificación asociada a ella. Entre los costos principales para la recolección de residuos se encuentra la cantidad de residuos recogidos que no son aprovechables mezclados con aquellos que sí lo son, la operación extra de clasificar los residuos que pueden ser peligrosos y recortar la vida útil del relleno sanitario. Como lo indica Matsumoto S. (2011) en la evaluación referente a la separación de los residuos sólidos de los hogares con el fin de medir la eficiencia de estas políticas en Japón, los beneficios y costos asociados a la actividad varían entre los municipios, adoptándolos bajo los perfiles demográficos y cultura de la población.

En la literatura diversos autores han realizado modelos de costos que permiten hacer la comparación entre los métodos existentes para la recolección de residuos sólidos, es decir, entre el curbside que ya se conoce su definición y el drop-off. Este último consiste en dejar la cantidad de residuos sólidos en puntos o lugares establecidos para su posterior recolección. El estudio entre variables que incluyen los costos fijos y variables por vehículo, el costo de personal, el costo de un contenedor o bolsa, y los costos de emisión (Groot et al., 2014) mencionan estos

aspectos como determinantes para la toma de decisiones asertivas al momento de realizar cambios estratégicos en el método de recolección.

En Portugal, la comparación de los factores económicos generados a partir de tres escenarios: la recogida tradicional, no clasificados, la recogida selectiva de residuos orgánicos en general y la recogida selectiva de residuos orgánicos generados en las principales comunidades urbanas, dejando de lado los residuos biológicos para el compostaje doméstico (Gomes et al., 2008) permitió simular los costos de las operaciones, donde para el caso según las características demográficas de las poblaciones estudiadas, los métodos de recolección clasificada de residuos no necesariamente deben ser mayor que el método tradicional (residuos mezclados).

2.2.4 Gestión de residuos sólidos en Colombia

En el estado colombiano, aunque se esté trabajando por crear conciencia ambiental y velar por un adecuado manejo de residuos sólidos acompañado de una logística eficiente, con el fin de tener un ambiente sano y apropiado desde los diferentes escenarios, falta mucho compromiso por parte de los actores que componen la cadena formada desde la explotación de los recursos naturales, hasta el consumidor final de los diferentes productos ofertados en el mercado, resultado de las actividades industriales y/o productivas. Las generaciones avanzan de manera continua y uno de los legados que se debe inculcar es precisamente la responsabilidad ambiental y el desarrollo sostenible, cuidar los recursos naturales es una tarea que en el presente representa en gran medida el bienestar de las generaciones futuras y la mitigación de la contaminación del medio por medio de la realización de tareas con sentido de responsabilidad ambiental.

La implementación de sistemas o programas en Bogotá, D.C, referentes al manejo responsable de los residuos sólidos generados por la población, es una tarea ardua por el crecimiento de habitantes de la ciudad que repercute en el aumento de residuos generados y por

ende en la mejora logística del proceso de recolección de residuos sólidos. Una revisión del programa distrital para la gestión integral de residuos: Programa Basura Cero (Avendaño, 2015) es vital para conocer la viabilidad de este. Al final se encuentra la existencia de dos comportamientos que determinan el adecuado manejo de los residuos: el crecimiento demográfico y el comportamiento consumista. Además, el apoyo prestado por parte de los entes públicos y privados encargados del buen proceso de la recolección de residuos y los habitantes, manifiesta bajo interés y por ende la falta de un trabajo sistémico y eficaz en materia logística.

La falta de aprovechamiento de residuos altamente aprovechables, en las distintas regiones del país, representa uno de los ejes problemáticos en la responsabilidad ambiental y desarrollo en las alternativas de innovación y optimización de recursos a nivel nacional, quedando de manifiesto en los planes de gestión integral de residuos sólidos de distintas ciudades.

El aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos en Colombia generalmente se da por la aplicación de técnicas como el compostaje (Jaramillo & Zapata, 2008) resaltando que esta genera gran utilidad en la elaboración de actividades del agro, industriales y eléctricas. Los costos ambientales asociados a la operación de la recolección y transformación de los mismos en la mayoría de los casos no son sostenibles económicamente para la planta de tratamiento por la pequeña cantidad de residuos recaudados; no obstante, los beneficios de la gestión para el aprovechamiento de los residuos residenciales no solo aporta en la economía por la reutilización de los desechos y las implicaciones de los costos en el campo logístico, sino también en la generación de empleo y los sistemas blandos regionales. (Jaramillo & Zapata, 2008; Salvador et al., 2015)

El estudio de la propuesta para la recolección de residuos líquidos resultantes de la elaboración y consumo de alimentos en plazoletas de comida en la ciudad de Bogotá y su

posterior transporte para disposición final, realizado por Caicedo A. & Verjel K. (2010) es una buena opción para la propuesta de una alternativa de mejora social y aprovechamiento de desechos, donde los costos generados se incrementan conforme aumenta la generación de residuos, pero contribuye con la prevención de sanciones mayores a los costos de la práctica de separación o clasificación en la fuente y la confirmación de una cadena inversa capaz de generar un equilibrio costo-beneficio.

La elaboración de guías que eduquen acerca del tratamiento apropiado de los residuos sólidos y peligrosos (Paniagua, Giraldo, & Castro, 2011), donde se encuentran consignados la forma de manipulación de los mismos y su disposición final, con base a la reducción, reutilización y reciclaje, resultan una herramienta esencial para la culturización de la población. En Buenaventura (Dolores & Torres, 2007) proponen un modelo ambiental y financiero para la recolección de basuras y su manejo, donde se refleja las ventajas en el impacto económico, social y ambiental, junto con la generación de empleos, aumento de actividades turísticas y al alto sentido de responsabilidad, basado en la mejora de las características poblacionales y estructurales del caso urbano y apoyo económico de autoridades públicas a raíz del levantamiento de información inicial del proceso y comparación por pronóstico de las posibles cantidades de residuos obtenidas por la población.

Con base a las consideraciones anteriores, se puede inferir que la evaluación del proceso de recolección de residuos sólidos domésticos por medio de un modelo de costos, contribuirá significativamente a la optimización de recursos, la toma de decisiones, mejoramiento logístico del proceso y la eficiencia en el desarrollo sostenible, debido a la evaluación de cada uno de los componentes presentes en el mismo; aportando a la reducción del impacto ambiental, administración y planeación estratégica de la actividad. Además, la importancia de la relación

con las características demográficas de una región determinada, permitiendo la viabilidad de planteamientos que se puedan generar para el proceso colectivo de la población afectada y las organizaciones encargadas de la prestación del servicio de aseo, culturizando y vislumbrando oportunidades de desarrollo y mejoras, en el campo ambiental, social, político y económico.

2.3 Marco conceptual

Residuos Sólidos: Hace referencia a todos los restos de materiales tangibles que no pueden ser usados para cumplir la función con los que fueron obtenidos inicialmente o ya cumplieron su vida útil u objetivo, ya sea en el sector industrial, comercial, domiciliaria y cualquier otro afín que genere estos. Es importante decir, que estos residuos pueden ser clasificados en distintos tipos y dependiendo de ello pueden ser reutilizados para un mejor aprovechamiento de los mismos, teniendo en cuenta su peligrosidad.

PGIRS: Son las siglas significativas del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos para la ciudad de Barranquilla contemplado para los años del 2016 hasta el 2027, el cual describe la situación actual de la ciudad en materia de aseo, específicamente de los residuos sólidos generados en los distintos sectores segmentados por la empresa recolectora de todo tipo de residuos en Barranquilla y además anexa la gestión planificada por la Alcaldía Distrital de la ciudad para la solución de los problemas más críticos identificados en la misma, por ello, se consigna el diagnóstico inicial de Barranquilla en el sector aseo y las soluciones proyectadas en un plan de acción a largo plazo para cada uno de los puntos críticos para mejorar el proceso de recolección de residuos sólidos en la ciudad de Barranquilla.

Respel: Son residuos peligrosos generados en el sector industrial, comercial, de la salud e incluso domiciliario, los cuales repercuten de gran manera en el tema ambiental y se hace necesario una buena planificación para su control y evitar que al ser desechados tengan como

destinos fuentes naturales que pueden afectarse por la presencia de estos. Como ejemplo de ellos se tienen: las baterías, residuos hospitalarios, tintas, aceites usados, entre otros.

Curbside: Es el método generalmente aplicado para la recolección de residuos sólidos en la ciudad de Barranquilla, conocido también como método de recogida en la acera, el cual se ejecuta porque cada una de los usuarios del proceso de recolección (casas, apartamentos y residencias) dispone finalmente sus residuos en la acera de la calle de sus domicilio o inmueble para que la volqueta o camión recolector asignado por la empresa de aseo se dirija haciendo paradas en cada uno de los frentes domiciliarios, con el fin llevar el volumen de residuos sólidos dispuesto por cada usuario hasta el relleno sanitario.

Drop-off: Es uno de los métodos para la recolección de residuos sólidos, sin embargo, su particularidad es establecer puntos donde los usuarios deben llevar sus residuos, haciendo más óptimas sus rutas por disminuir las distancias recorridas por los camiones recolectores. Generalmente, los puntos objetos de recolección están acondicionados con contenedores de volúmenes específicos para responder a la generación de residuos de los usuarios, es importante establecer una buena localización de estos, porque de su buena planificación depende la mejora en la eficiencia de los recursos del proceso de recolección en comparación con el método Curbside.

Puntos de Acopio: Estos son puntos acondicionados para recibir volúmenes de residuos sólidos de cualquier sector, en donde deberán estar clasificados los mismos para su aprovechamiento o reutilización, es decir, solamente los residuos aprovechables se quedarán en estos puntos para sufrir la disposición adecuada con los equipos destinados para dichos procesos. Los residuos no aprovechables como por ejemplo los orgánicos y peligrosos serán dispuestos para ser recogidos por la volqueta o camión recolector de la empresa designada para la

recolección de los mismos. Cabe resaltar, que estos puntos deben sufrir un control estricto para evitar circunstancias negativas en el mismo y su entorno como roedores, gases y cualquier otro efecto perjudicial.

Kilómetros Rodoviaros: Es el número de Km recorridos por las volquetas o camiones recolectores en el sector domiciliario de la ciudad de Barranquilla, desde el punto de origen o despacho de los mismos hasta el relleno sanitario en donde son dispuestos finalmente los residuos, teniendo en cuenta el número de viajes realizados diaria, semanal y mensualmente.

Logística Inversa: La logística inversa contempla la cadena conformada por los productos, materias primas o cualquier otro objeto desde su punto de consumo o donde es desechado, hasta el punto de origen o puede ser llevado para tratarse después de haber cumplido su ciclo de vida útil, para su aprovechamiento. La logística inversa es necesaria para mitigar el impacto de contaminación a raíz de los productos comprados y residuos generados, complementando la cadena de suministros y logística conocida en cada uno de los sectores, industrial, comercial, domiciliario, salud, minero, entre otros.

Clasificación en la fuente: Es la actividad de clasificar los residuos según su tipo al momento de ser dispuestos finalmente para su recolección por parte de los usuarios domiciliarios o residenciales desde el interior de sus viviendas, con el fin de evitar la contaminación de los residuos aprovechables por aquellos que no lo son y contribuir con una mejora en el proceso por disponerlos de manera adecuada.

Contenedores: Los contenedores son los recipientes en donde se hace la disposición final de los residuos sólidos, generalmente usados en el método Drop-off, caracterizado por tener puntos acondicionados para la recolección de los desechos que para el presente caso deben estar en dicho recipiente. Estos se encuentran disponibles en varios tipos, igualmente como los tipos de

residuos, debido a que facilitan el almacenamiento de estos en su etapa de disposición final y mitigan el impacto ambiental en el entorno en que se encuentran. Para los contenedores hay especificaciones basadas en normativas según el país, dictando la capacidad o el volumen máximo permitido para los mismos, considerando aspectos como la ubicación y cantidad de basura dispuesta, ayudando al control y estandarización de los procesos de recolección, resaltando que este contribuye en la reducción de costos en comparación con otros métodos como el curbside.

Sostenibilidad: La sostenibilidad se refiere al equilibrio que debe existir entre las operaciones en el aspecto económico, ambiental y social. Para el presente caso, visto desde la estrecha relación que guardan las operaciones logísticas con el ambiente. Para la planificación de cada una de las actividades que se desempeñen en cualquier sector, es necesaria una buena logística, dependen en gran medida de ello resultados eficientes; de ahí la importancia de la logística inversa para tratar los residuos generados dentro de una cadena inversa que denote responsabilidad tanto para la sociedad consumista como la ofertante, aspecto que encaja perfectamente en el sector colombiano donde los volúmenes de residuos generados son altos y aprovechando estos se puede tener alta eficiencia en las operaciones, lo que quiere decir, una logística en aras de la eficiencia sostenible.

Aprovechamiento: Es el procesamiento dado a cada uno de los tipos de materiales con características reutilizables, es decir, sin ningún grado de contaminación que afecten esta actividad. Cabe resaltar, que para aquellos residuos como los orgánicos y respel el aprovechamiento se da a partir de la obtención de las mejores prácticas relacionadas con esta como los lixiviados para el primero y el rehúso o remanofacturación para los segundos.

Compactadora: La compactadora es la caja trasera de los camiones en donde se colocan los residuos recolectados en el sector correspondiente y que a medida en que se satura, tiene la capacidad de disminuir el volumen físico de las mismas a partir de comprimirlos. Para las compactadoras, existen distintos volúmenes que a su vez pueden ser relacionados con la cantidad de residuos en materia de peso de los residuos objeto de disposición. Cabe resaltar, que este vehículo es usado actualmente en la ciudad de Barranquilla para el proceso de recolección de residuos domiciliarios.

Frecuencia de Recolección: Hace referencia al horario en que la empresa encargada de prestar el servicio de aseo a un determinado municipio envía a los camiones para realización de sus respectivas labores, teniendo en cuenta el número de días en la semana y el horario para cada uno de ellos.

Sector Domiciliario o Residencial: Al hacer énfasis en cualquiera de estos dos términos mencionados, se hace referencia a la población usuaria objeto de estudio en el presente documento, específicamente de todas las casas y apartamentos que conforman las zonas de la ciudad de Barranquilla en donde se presta el servicio de recolección de residuos sólidos.

Lixiviados: Los lixiviados son los fluidos o sustancias líquidas resultantes de la descomposición de los residuos sólidos una vez son desechados, caracterizados por generar malos olores, ser ácidos, y de apariencia física desagradable, causando un impacto negativo al ambiente y en caso de filtrarse problemas significativos para los suelos y medio ambiente.

Disposición Final de Residuos: La disposición final de los residuos es la manera en como se le da tratamiento final a todos los residuos generados por la población de una determinada zona, las cuales pueden hacer a través de la descarga en rellenos sanitario, reutilización de los mismos por el proceso de reciclaje, u operaciones en estaciones de transferencia, centros de acopio o

celdas de contingencias con las que cuentan las empresas prestadoras de este servicio para dar un proceso altamente responsable con el medio ambiente y la sociedad.

Botaderos a Cielo Abierto: Son espacios ubicados dentro de la ciudad, en donde se disponen residuos sólidos sin estar estos en condiciones de recibir los mismos. Por tal motivo, se consideran prohibidos, debido a que desencadenan una problemática ambiental y contaminación visual en el caso urbano y principalmente a la comunidad aledaña a ellos. En la mayoría de casos estos lugares son fuentes de proliferación de plagas que causan graves problemas de salud en el ser humano. Para el caso de Barranquilla, a raíz del análisis hecho por los datos suministrados en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos la problemática con estos botaderos es crítica, al punto de no tener identificados la cantidad de estos en la ciudad.

Residuos Sólidos Aprovechables: Los residuos sólidos aprovechables, son todos aquellos que pueden ser reutilizados después de haber sido dispuestos para ser desechados, obtenidos a través del proceso de reciclaje y en la mayoría de los casos es necesario la aplicación de un proceso industrial para su aprovechamiento. Un ejemplo de este tipo de residuos es, el papel, cartón, plástico, vidrio y metal.

Relleno Sanitario: Los rellenos sanitarios son los lugares destinados para la disposición final de los residuos sólidos, los cuales suelen estar divididos por vasos para el cubrimiento de los mismos a través de procesos especiales que garanticen la adecuada disposición de ellos y el bienestar de las zonas aledañas a este. Es importante mencionar, que estos lugares en muchos casos tienen tecnologías inmersas para el aprovechamiento de los lixiviados generados por los residuos depositados, los cuales son tratados por procesos en donde el impacto ambiental generado por estos se disminuya. Aunque en países europeos, los rellenos sanitarios están quedando en la historia por la disposición de residuos con ayuda de nuevas tecnologías de

tratamiento de estos y por el cambio cultural en la población, que denota solo el aprovechamiento de los residuos generados.

Volqueta o Camión Recolector: Una volqueta o camión recolector, es el vehículo usado para el proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios en las zonas en donde se lleve a cabo la prestación del servicio de aseo, los cuales tienen ligados un mecanismo compactador que reduce el volumen de los residuos recolectados, obteniendo a través de ello la capacidad en toneladas y volumen en yardas destinadas para el mecanismo al momento de ser fabricados. Cabe decir, que estos vehículos generan gran impacto en la parte económica de la recolección de residuos por estar en la etapa del proceso que genera los mayores costos para este: El transporte. Para el caso práctico, los vehículos tienen asociados costos fijos y variables constituyentes del costo total del proceso iniciado desde el despacho de los camiones, hasta el regreso de estos a su lugar de partida, teniendo en cuenta solo el momento de la llegada de los mismos al relleno en donde se realiza la respectiva disposición de ellos.

Proceso de Recolección: El proceso de recolección de residuos sólidos está conformado desde el despacho o salida de los camiones de aseo técnico, hasta su lugar de origen que para el presente caso corresponde a la localidad en donde este desarrollara el proceso de recolección al sector domiciliario de la ciudad de Barranquilla, continuando con el transporte desde la respectiva localidad, hasta el parque ambiental los pocitos (relleno sanitario en donde se realiza la disposición), donde el camión lleno en su capacidad máxima para realizar el proceso de descarga, posteriormente regresa a la localidad en donde fue asignado para realizar nuevamente el proceso de recolección de residuos y regresar al relleno sanitario hacer su respectivo proceso de descarga, saliendo finalmente a la base de partida en donde es parqueado final por haber

completado el proceso asignado para ese día. Por lo anterior, cabe aclarar que el camión recolector es despachado 2 veces para hacer su respectivo proceso de recolección.

Impacto Ambiental: El impacto ambiental hace referencia al acto que afecta el medio ambiente o entorno de manera negativa o positiva, después de haber ocurrido un aspecto ambiental producto de cualquier aspecto o actividad que asocie generación de residuos, emisión de material o gas o cualquier otro aspecto, que afecte las especies de flora, fauna o humana de su entorno.

Logística: La logística es la gestión necesaria para garantizar el flujo y operación de cada una de las etapas de un determinado proceso considerando todas las partes interesadas del mismo, desde su inicio hasta el final con el fin de obtener resultados óptimos y hacer que cada elemento se encuentre en el lugar donde debe estar en el momento indicado. El éxito de una buena logística depende de su grado de planificación y aunque es necesaria en todas las operaciones, el transporte es uno de los sectores en donde el grado de logística debe ser mayor para su buena sincronización. Para el caso de la recolección de residuos, el transporte constituye entre el 50 y 90% del proceso lo que aumenta la concentración para el mismo en materia de operación y económica.

Reutilización de Residuos Sólidos: La reutilización de residuos sólidos, hace referencia al proceso en que se someten los residuos sólidos aprovechables generados por cualquiera de los sectores existentes, es decir, domiciliario, industrial, comercial, etc. Para el presente caso, los residuos sólidos aprovechables generados por el sector domiciliario de la ciudad de Barranquilla son: papel, cartón, plástico, metal y vidrio, los cuales tienen asociados un valor por su venta a empresas encargadas del reprocesamiento de este, conocidas generalmente como el sector chatarrero para el caso de la costa colombiana. La importancia del reciclaje radica precisamente

en el aprovechamiento de estos por el proceso descrito, generado por la separación que se puede realizar desde la fuente, el uso de plantas de tratamiento de residuos sólidos, puntos o centros de acopio y estaciones de transferencia, trayendo consigo la conformación de una de cadena logística inversa para los residuos sólidos generados.

Cabe mencionar, que para el caso local, en la ciudad de Barranquilla no se lleva a cabo el proceso de reutilización de residuos de manera formal, solo un pequeño margen de la ciudad desempeña esta actividad, sin tener pleno conocimiento de la normativa que rige este proceso y que aun las autoridades locales no identifican el número de centros destinados a la misma, análisis hecho por la información suministrada en el PGIRS, contemplado para la ciudad de Barranquilla desde el año 2016 hasta el año 2027.

Modelo Actual: El modelo actual, se refiere a la manera en como se está ejecutando el proceso de recolección de residuos sólidos en la ciudad de Barranquilla por parte de la empresa encargada de prestar el servicio de aseo y recolección en el sector domiciliario, el cual es contemplado en cinco etapas para su proceso logístico: Salida del camión de su punto inicial hasta la localidad de la ciudad Barranquilla destinada para prestar el servicio; desde la localidad hasta el parque ambiental los pocitos para primera descarga; desde el parque ambiental los pocitos nuevamente hasta la localidad para hacer el respectivo proceso de recolección; desde la localidad hasta el parque ambiental los pocitos para realizar la segunda descarga y finalmente desde el parque ambiental los pocitos hasta el punto de partida en el inicio de turno cada día y en donde son parqueados los camiones encargados de dicho proceso.

Contenerización: Se refiere al proceso realizado en los puntos en donde se destinan canecas para el depósito de residuos sólidos domiciliarios, generalmente en zonas donde el ingreso de los vehículos se hace complejo y es implementado el método de recolección Drop-Off que entre

otras cosas, es más viable en materia de costos que el método Curbside. En este se acondicionan las canecas o contenedores destinadas con la capacidad adecuada para recibir la producción de basura de la zona, además de la planificación para el control y mantenimiento de las mismas a fin de mantenerlas óptimas como parte de una solución viable y evitar convertirlas como un posible factor contaminante del entorno, dado que para el caso se encuentran en un lugar generalmente abierto.

Producción Per cápita de Residuos Sólidos: La producción Per cápita de residuos sólidos hace referencia al indicador de la producción de residuos por habitante, para el presente caso por cada habitante de la ciudad de Barranquilla, el cual es determinado considerando el consumo (asociado a su vez a las cantidades producidas por las industrias) y el crecimiento poblacional. Para Colombia es el DANE generalmente el ente encargado de realizar tal indicador a través de la relación mencionada.

Centros de Acopio: Los centros de acopio son lugares donde se llevan los residuos sólidos recolectados a fin de tener un lugar en el cual se les brinde un tratamiento especial a los residuos sólidos aprovechables, separándolos para reciclarlos y darle posteriormente un uso, generalmente con empresas aliadas encargadas de hacer dicho tratamiento o en algunos casos integrándolos por las plantas de tratamiento de residuos. Cabe decir, que de acuerdo con la tecnología del centro de acopio entregan los residuos orgánicos y Respel a las rutas recolectoras de residuos encargadas de la zona en donde se encuentre ubicado.

Rutas Selectivas: Estas rutas son las encargadas de hacer el proceso de recolección de residuos sólidos en la ciudad, a través de la clasificación de los mismos, con el fin de promover la cultura del reciclaje y el aprovechamiento de los residuos, contribuyendo de igual forma al ejecución de una cadena de logística inversa de los mismos, implementando una nueva técnica

beneficiosa para la comunidad y las entidades encargadas del proceso de recolección y por ende afectando a los costos de transporte del proceso.

Modelos Multi-objetivos: Los modelos multi-objetivos desde la perspectiva de la investigación de operaciones para el análisis de los procesos, hacen énfasis en el tratamiento de una situación que busca llegar a la solución o mejora de más de un solo aspecto, es decir tiene como propósitos distintos focos y por ende más de una función objetivo. Comúnmente, son usados para modelos de localización, ruteo, planeación y distribución de recursos, entre otros.

Metaheurísticas: Las metaheurísticas son técnicas avanzadas para la solución de amplios problemas a través del uso de programación o software, los cuales buscan tratar situaciones de una manera más rápida que los métodos clásicos de optimización a fin de obtener una respuesta más eficiente, cabe aclarar que las soluciones de estas son de un tipo más global y que debe definirse muy bien su alcance para evitar inconsistencias en la búsqueda de soluciones.

Recolección Indiferenciada: La recolección indiferenciada de residuos sólidos, se refiere a la manera mezclada en como son dispuesto los residuos y que posteriormente el vehículo encargado de recolectarlos lo lleva hasta el relleno sanitario en donde se disponen finalmente sin importar su tipo, es decir, si son aprovechables o no, evidenciando una falencia en el proceso por no llevar a cabo uno de los procesos que resulta más provechoso que es el reciclaje y recortando la vida útil del relleno sanitario. Por ende, se puede afirmar que la planeación para el proceso logístico de recolección de estos no es óptima para el caso de las ciudades en donde son mezclados los residuos y no se busca mejoría para tal práctica.

Capítulo 3: diseño de un modelo de optimización del proceso de recolección en Barranquilla

3.1 Caracterización del proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios en Barranquilla

Antes de iniciar con el planteamiento y desarrollo del modelo de optimización propuesto para el proceso de recolección de residuos domiciliarios en Barranquilla, es importante aclarar la manera en cómo se lleva a cabo actualmente, resumiendo cada uno de los planteamientos desarrollados en apartados anteriores a partir de la caracterización realizada, en la cual fue considerada información de tipo: demográfica, sociocultural, características y aspectos del proceso de recolección actual.

La caracterización del proceso de recolección es de vital importancia debido a la facilidad generada al momento de conocer la manera en como es desarrollado este en cada una de las etapas que lo componen y para el presente caso, el conocimiento de los datos bases para determinar cifras y aspectos a raíz del uso del cálculo matemático. A partir de ello, en el estudio realizado para la situación actual de la ciudad de Barranquilla, se identifica la problemática del desaprovechamiento de los residuos sólidos generados en el sector domiciliario tal y como lo muestra la cotidianidad al disponer los residuos mezclados en una sola bolsa, acompañado por las consecuencias negativas como el daño paisajístico en el casco urbano (botaderos a cielo abierto) y el sobre costo al momento de hacer la recolección de los mismos tal y como lo indica Groot en el desarrollo de sus artículos mencionados en el apartado 1.1. del documento.

El marco de ideas anterior, se soporta en las cifras dadas por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios de la Republica de Colombia en el año 2015, donde el departamento del

Atlántico genera 2043,72 toneladas diarias, siendo la ciudad de Barranquilla la responsable de emitir 1295,48 diarias, las cuales son depositadas en el relleno sanitario; asimismo, la producción per-cápita de basura en el área urbana de la ciudad según los informes emitidos por la Alcaldía de la ciudad en el año 2015 es de 0,895 Kg/hab-día. Otro aspecto a resaltar es que el PGIRS no tiene un porcentaje de los hogares que llevan a cabo el proceso de recolección en la ciudad de Barranquilla, sin embargo, tiene el porcentaje de la cantidad de los materiales según el tipo, emitidos por estrato en la ciudad.

No obstante, las cifras de los hogares que presentan los residuos sólidos de manera adecuada para su aprovechamiento no está actualizada, debido a que en la actualidad no se tiene pleno conocimiento de los centros de acopio dedicados a dicha actividad, es decir, las cifras no están actualizadas por ninguno de los entes responsables de ello, deducido a partir del análisis hecho por la Alcaldía de Barranquilla y la empresa encargada del proceso de recolección actualmente en la ciudad al plantearse en el PGIRS las problemáticas, objetivos y soluciones para el tratamiento de estos entre los años 2016 y 2027. De lo anterior, se tiene conocimiento de 89 centros de acopio entre pequeños, medianos y grandes y solo se reportan 219 recicladores en el gremio formal, información dada por el DAMAB en el año 2015.

La cantidad de residuos sólidos domiciliarios generados en la ciudad de barranquilla es de 25118,666 según el PGIRS, y actualmente ninguno de los sectores con autoridad sobre la ciudad y el sector objeto de estudio, han implementado técnicas eficientes para mitigar el impacto generado, como por ejemplo desde el punto de vista normativo, optimización del proceso y demás que contribuyan con la optimización y mejora del proceso en lo que se refiere al aprovechamiento de los residuos.

Los problemas y falencias mencionados hasta el momento se encuentran consignados en el PGIRS, donde la prioridad de estos se califica como alta, sin embargo, aunque han sido identificados, las soluciones planteadas para estos y los proyectos presentados en el mismo apuntan a soluciones macro, como por ejemplo la construcción de una planta de tratamiento de residuos en el relleno sanitario actual de la ciudad y en este periodo de tiempo se encuentran también consignada una tarea significativa para la mejora del proceso como la enseñanza a la población de la ciudad. Por ello la importancia de conocer y determinar otros aspectos como los tratados en el presente proyecto, que en materia de costos son representativos para la mejora del proceso actual.

Como se ha podido observar, una de las fuentes principales para la caracterización del proceso actual es el PGIRS 2016-2027, en el cual se describe toda la situación actual de la ciudad en materia aseo, la cantidad de residuos sólidos generados en los distintos sectores en los que se encuentra segmentada la ciudad (domiciliario por estrato, industrial, centro y mercado, barrido de calles, poda de árboles, residuos de construcción, entre otros), la frecuencia de recolección para cada una de las zonas y la gestión planificada entre la alcaldía de Barranquilla y la empresa encargada del proceso de recolección para los problemas detectados. Cabe resaltar, que las soluciones dadas en materia de recolección y aseo se consideran a largo plazo por las características socioculturales de la ciudad y la gravedad de algunos de ellos.

El método de recolección de residuos empleado en la ciudad de Barranquilla es el Curbside, el cual consiste en que la volqueta compactadora recorra cada una de las aceras y frente de las casas de la ciudad para la recolección de las bolsas dispuestas y posteriormente llevarlas hasta el relleno sanitario. De igual forma, los Kilómetros rodoviarios son considerados según el recorrido que hacen los camiones (descrito en la figura 16 y 17), teniendo en cuenta que son dos viajes

realizados al día según información suministrada por la empresa encargada del proceso de recolección. El proceso objeto de estudio se puede detallar en la figura 15.

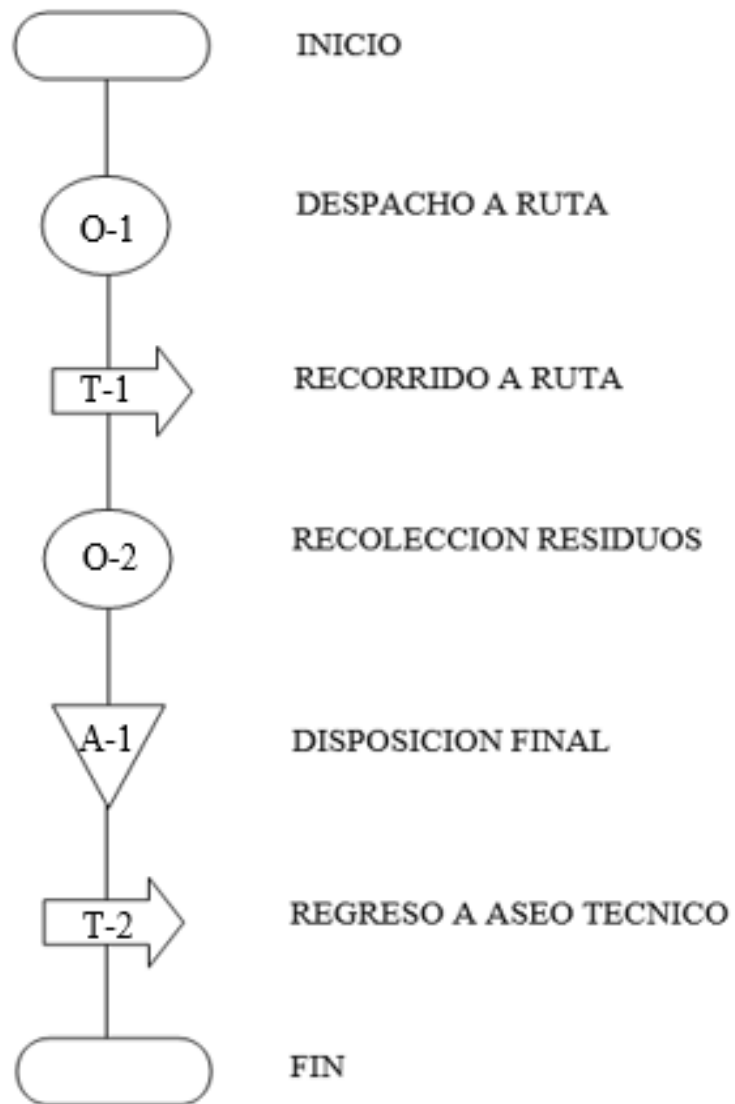
El proceso de recolección de residuos sólidos está conformado desde el despacho o salida de los camiones de aseo técnico, hasta su lugar de origen que para el presente caso corresponde a la localidad en donde este desarrollara el proceso de recolección al sector domiciliario de la ciudad de Barranquilla, continuando con el transporte desde la respectiva localidad, hasta el parque ambiental los pocitos (relleno sanitario en donde se realiza la disposición), donde el camión lleno en su capacidad máxima realiza el proceso de descarga, posteriormente regresa a la localidad en donde fue asignado para realizar nuevamente el proceso de recolección de residuos y regresar al relleno sanitario hacer su respectivo proceso de descarga, saliendo finalmente a la base de partida en donde es parqueado final por haber completado el proceso asignado para ese día. Por lo anterior, cabe aclarar que el camión recolector es despachado dos veces para hacer su respectivo proceso de recolección.

Es importante mencionar, que actualmente en el relleno sanitario de la ciudad se encuentran dispuestas un grupo de personas para separar los desechos generados aprovechables, evitar que estos vayan al vaso del relleno y tratarlos con tecnología y procesos con los que cuentan, además existen aliados estratégicos a los que se realiza la venta de estos para tratarlos y otros que se encargan de tratar aquellos residuos con un nivel de peligro elevado, finalmente se le da el tratamiento que estos requieren; lo anterior obtenido a partir de una fuente confiable en la empresa encargada del proceso de recolección.

Con base a la revisión literaria de los artículos y al análisis del modelo de recolección domiciliaria actual, se plantea diseñar 2 escenarios que permitan optimizar el proceso, ya sea por la reducción de costos o el aumento de las utilidades.

En la Figura 15, se muestra un diagrama de flujo que busca mostrar de manera clara el proceso de recolección domiciliaria actual. Empezando por el despacho de los vehículos desde aseo técnico ubicado en la calle 29 # 21-279 en Barranquilla hacia cada localidad, luego al salir las flotas de vehículos se les asigna una ruta o localidad dentro de las 5 disponibles. Una vez los vehículos han llegado a su destino que en este caso es el centroide de la localidad comienzan con el proceso de recolección, cabe aclarar que apenas los vehículos tengan su capacidad a tope llevaran la carga a la disposición final en pocitos ubicado en la vía Juan Mina-Tubara al suroccidente de Barranquilla, para luego regresar a aseo técnico y empezar con el proceso nuevamente.

Figura 16



Nota. Elaborado por: Autores.

Para empezar con el modelo teórico fue necesario el levantamiento de la siguiente información:

División por zonas o localidades: La información de las localidades fue obtenida de la página de la alcaldía de Barranquilla² donde se muestran las 5 localidades que conforman Barranquilla como son: Riomar, Norte-centro histórico, Sur Occidente, Sur Oriente, Metropolitana.

Asignación de barrios a cada zona y sus generalidades: El PGIRS 2015 dice el índice de producción de basura per cápita por habitante (PPC) y la página de la alcaldía de Barranquilla muestra la población por barrio según localidad. Usando esta información, se puede saber la producción de basura (ton/mes) de cada localidad multiplicando la población de cada barrio por el índice per cápita, y posteriormente sumando la producción de cada barrio para hallar el valor total por localidad.

Información del PGIRS con el de una empresa de recolección: Para este caso se compara la información de las toneladas por día de basura según el PGIRS con las de una empresa de recolección y efectivamente los valores fueron muy cercanos entre sí por lo que no hay duda en la veracidad de la información.

Producción de basura por estrato: Esto consiste en asignar a cada barrio su estrato ya que con la información suministrada por el PGIRS se puede saber la producción por tipo de material domiciliario, esto con el objetivo de usarlo para los escenarios propuestos.

Distancias y cantidad de viajes: Las distancias de recolección domiciliaria fueron halladas gracias al uso de la herramienta Google Maps, la cual permitió estimar las distancias según la ruta asignada para cada localidad. Así mismo para la cantidad de viajes se trabajó con el estándar diario establecido por la triple AAA (PGIRS, 2015), también la frecuencia de recolección semanal fue sacada del programa de prestación de servicios de aseo (PPS, 2016). Multiplicando

² Alcaldía de barranquilla. www.participacion.barranquilla.gov.co

la frecuencia semanal y los viajes diarios dan como resultado los viajes semanales de cada vehículo.

Capacidades de los vehículos: Los tipos de vehículos que se utilizaron para el modelo propuesto fueron extraídos de la ficha técnica compactadores (FTC, 2016) de la página de la triple AAA. Donde se especifica las yardas cubicas (Yd³) de cada vehículo, luego mediante la aplicación de una regla de tres simple se convirtieron a toneladas por cuestiones de practicidad al trabajar el modelo.

3.2 Estructura del modelo de costos de residuos sólidos domiciliarios en Barranquilla

El modelo propuesto está diseñado para estimar los costos y utilidades del proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios en Barranquilla, enfocado a calcular los costos logísticos del proceso, entendiendo que el transporte representa entre el 50 y 90 % de los costos tal y como se mencionó en la revisión literaria.

Para el mejor entendimiento de la estructura funcional del modelo, se ha decidido dividir este capítulo en 3 secciones que conforman el modelo, entre ellas: estructura básica del modelo, estructura de costos del modelo y estructura de utilidad.

3.2.1 Estructura básica del modelo

Con el levantamiento de la información mencionada en el desarrollo conceptual y la caracterización hecha en la tabla 2, se colocan los componentes con su respectiva nomenclatura, estos son: inicio-destino, número de kilómetros rodoviarios, producción ton/mes de basura, número de viajes, número de camiones asignados y verificación de capacidad. En la tabla 1, se puede observar cómo está estructurada la tabla que contiene los parámetros de entrada del modelo.

Tabla 1

Estructura básica del modelo propuesto.

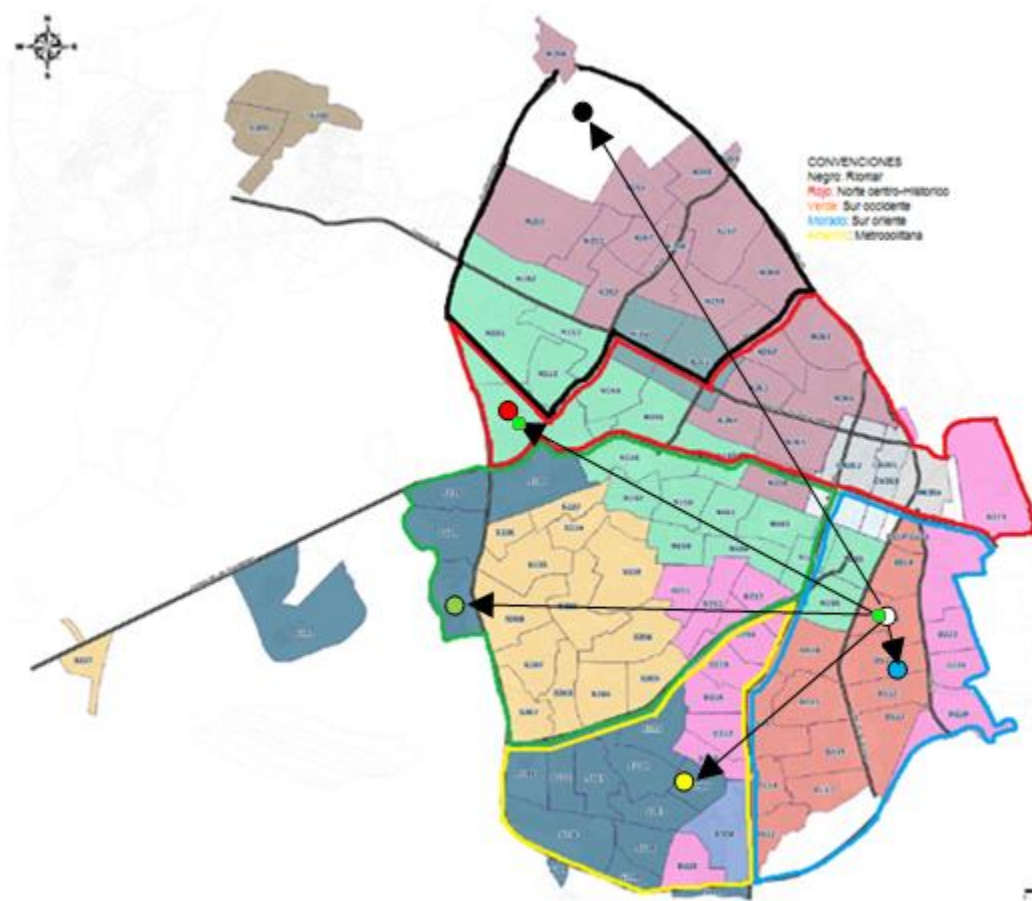
						Xij		CAP _{imes} ≥ P _{imes}			
		i	n _{imes}	P _{imes}	m _{mes}	N° Camiones asignados		Verificación de capacidad por tipo de camión mensual			
Inicio	Destino	Ruta	No km rodoviarios mensual	Producción ton/mes de basura	No de viajes en el mes	CAP. 10 TON	CAP. 15 TON	CAP. 10 TON	CAP. 15 TON	Total	Confirmación
TÉCNICO	Riomar	1									
	ASEO Norte centro	2									
	histórico										
	Sur occidente	3									
	Sur oriente	4									
	Metropolitana	5									

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

A continuación, se detallan cada uno de los componentes:

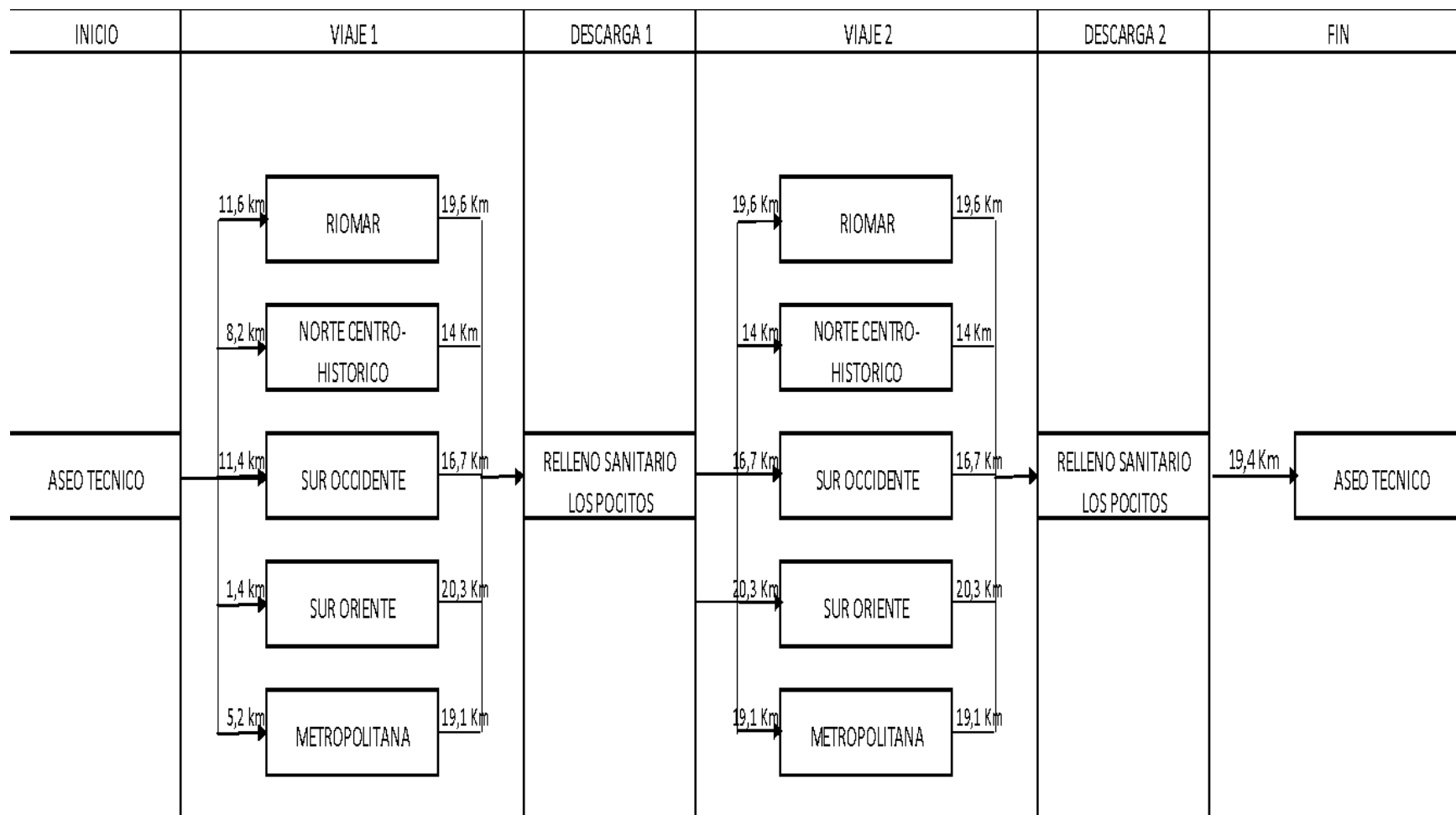
Inicio-destino: El inicio-destino comprende el punto de partida que es de aseo técnico hasta el punto final que es la localidad, considerando que son 5 localidades hay asignadas 1 ruta para cada una. En la figura 16 se puede observar la localización de los centroides de cada localidad, así como las rutas que establece la triple AAA según el programa de prestación de servicio de aseo (PPS) para el proceso de recolección. Con base en lo anterior, se diseñó un modelo gráfico representado en la figura 17 que detalla las distancias de la ruta asignada a los vehículos de recolección domiciliaria. Estas distancias fueron proporcionadas usando la herramienta Google Maps.

Figura 17.



Nota. Elaborado por: PPS 2016

Figura 18.



Nota. Elaborado por: Autores

Tal como se puede apreciar en la figura 17 se muestra la ruta que deben seguir los vehículos desde su inicio hasta su destino. En el trayecto los vehículos parten de aseo técnico con lo cual hacen el primer viaje, una vez llenan su capacidad se van al relleno sanitario los pocitos para realizar el primer descargue, luego se despachan nuevamente hacia la localidad para hacer el segundo viaje, posteriormente al estar llenos regresan a pocitos para descargar por segunda vez. Finalizados los 2 viajes y los 2 descargues, los vehículos regresan a aseo técnico para poner fin al proceso de recolección.

Número de kilómetros rodoviarios: Este componente corresponde a la distancia que recorre un vehículo diariamente en la ruta asignada, multiplicada por la frecuencia de recolección semanal que según el programa de prestación de servicio de aseo (PPS, 2016) es de 3 para domicilios, pero como se quiere trabajar en meses, entonces basta con multiplicar por 4 para saber los kilómetros mensuales. La fórmula para el cálculo de los kilómetros rodoviarios mensuales queda como sigue:

$$n_{mes} = d_i * f * 4$$

Donde:

d_i : distancia de la ruta i

f : la frecuencia de recolección semanal

En la figura 18 que se encuentra a continuación se puede observar la frecuencia y los horarios de recolección para cada localidad y la designación en códigos por parte de la triple AAA para cada ruta.

Figura 19.

Macrorruta (Código)	Localidad	Frecuencia							Hora de inicio	Hora de finalización
		Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do		
N1	Norte Centro Histórico, Riomar, Suroccidente y Suroriente.	X		X		X			19:00	05:00
N2	Norte Centro Histórico, Riomar y Suroccidente.		X		X		X		19:00	05:00
N3	Norte Centro Histórico	X	X	X	X	X	X		19:00	05:00
N4	Riomar		X		X		X		06:00	17:00
S1	Metropolitana y Suroriente	X		X		X			06:00	17:00
S2	Metropolitana, Norte Centro Histórico, Suroccidente y Suroriente.		X		X		X		06:00	17:00
S3	Metropolitana	X	X	X	X	X	X		06:00	17:00
SW1	Metropolitana y Suroccidente.	X		X		X			06:00	17:00
SW2	Metropolitana y Suroccidente.		X		X		X		06:00	17:00
CD	Norte Centro Histórico	X	X	X	X	X	X		06:00	17:00
CN	Norte Centro Histórico y Suroriente.	X	X	X	X	X	X		19:00	05:00
M	Norte Centro Histórico y Suroriente.	X	X	X	X	X	X		19:00	05:00

Nota. Elaborado por: Autores

Producción ton/mes de basura: Para hallar la producción de basura en toneladas para cada localidad, fue necesario saber el índice de producción per cápita (PPC) obtenido del PGIRS, luego conocer la población total de cada localidad mediante la información demográfica extraída de la página de la alcaldía de Barranquilla. Entonces se multiplica el índice PPC por la población total de cada localidad para hallar la producción en Kg/día-habitante. No obstante, la producción se debe multiplicar por 30 días para que sea mensual y se debe dividir entre 1000 para convertirla a toneladas. La expresión que demuestra este cálculo es como sigue:

$$P_{imes} = N_i * PPC * 30/1000$$

Donde:

Ni: número de personas de la ruta i

En la tabla 2 se observa la población total de cada localidad y la producción ton/mes de cada una.

Tabla 2.

Toneladas mensuales producidas por localidad.

Localidad	Población total	Producción ton/mes
Riomar	66.387	1.782
Norte centro histórico	173.403	4.656
Sur occidente	327.319	8.789
Metropolitana	221.626	5.951
Sur oriente	290.102	7.789
Total	1.078.837	28.967

Nota. Elaborado por: PGIRS (2015)

Número de viajes: El número de viajes determina cuantas veces un camión debe visitar la ruta, en este caso se tiene según el (PGIRS, 2015) que un camión realiza 2 viajes diarios, además que la frecuencia de recolección domiciliaria es de 3, basta con multiplicar estos datos para hallar los viajes semanales. Ahora para pasarlo a meses se multiplica el producto de estos datos por 4 para saber los viajes mensuales de un vehículo. La fórmula quedaría así:

$$m_{mes} = v * f * 4$$

Donde:

v: número de viajes de un vehículo por día

f: frecuencia de recolección de un vehículo por semana

Número de camiones: Este componente es asignado por el usuario quien define la cantidad apropiada según la capacidad de vehículos a enviar la cual va relacionada con el siguiente componente.

Verificación de capacidad: Este último corresponde a la verificación de si los camiones de determinada capacidad que se asignaron a cada localidad pueden satisfacer las necesidades o la producción diaria en ton/mes de basura. Para el modelo propuesto se considera que para que sea óptimo la cantidad de vehículos asignados deben abastecer a las rutas que les fueron asignadas.

3.2.2 Estructura de costos del modelo

Definida la estructura básica del modelo propuesto, es ahora el turno de definir la estructura de los costos. Para esto, con base en las publicaciones del ministerio de transporte, SOAT (2016) y la empresa EMSER E.S.P., se han obtenido los costos fijos de vehículos y mano de obra, así como los costos variables de vehículos que varían en función de los kilómetros recorridos, valga la aclaración de que estos costos son mensuales. En la tabla 3 se muestran los montos fijos de

vehículos, en la tabla 4 los montos fijos de mano de obra y en la tabla 5 los variables de vehículos:

Tabla 3.

Costos fijos vehiculares.

Costos fijos	Capacidad camión (COP)	
	10 ton	15 ton
Depreciación	\$ 2.125.000	\$ 3.125.000
Rodamiento	\$ 1.573.296	\$ 1.573.296
SOAT	\$ 66.325	\$ 66.325
Parqueo	\$ 9.813	\$ 9.813
Total costos fijos	\$ 3.774.434	\$ 4.774.434

Nota. Elaborado por: Ministerio de transporte.2007

Tabla 4.

Costos fijos mano de obra.

Costos fijos mano de obra	Salario (COP)
Conductor	\$ 1.519.639
Ayudante 1	\$ 1.289.721
Ayudante 2	\$ 1.289.721
Total mano de obra	\$ 4.099.081

Nota. Elaborado por: EMSER ESP.2014

Tabla 5.

Costos variables vehiculares.

Costos variables vehículos	Capacidad camión (COP)	
	10 ton	15 ton
Mantenimiento	\$ 143	\$ 211
Neumáticos y repuestos	\$ 183	\$ 269
Combustible	\$ 2.733	\$ 4.019
Lubricantes	\$ 654	\$ 962
Limpieza	\$ 1.841	\$ 2.707
Total costos variables	\$ 5.554	\$ 8.168

Nota.. Elaborado por: EMSER ESP. 2014

Ahora bien, estos costos proporcionan la base para estimar las demás componentes de costos del modelo como son: costos de utilización fijos, costos de utilización variables, costos del personal de recolección, costo operativo, costo logístico, costo específico y costo anual. A continuación, se detalla cada costo:

Costo de utilización fijo: Este costo corresponde a lo que cuesta utilizar la cantidad de camiones de capacidad j para suplir a la ruta i (X_{ij}) por el costo fijo por capacidad del camión CF_j . Así:

$$CUF_{ij} = \sum_{j=1}^2 X_{ij} * CF_j$$

El resultado de la expresión esta en COP y la unidad es \$/mes.

Costo de utilización variable: En este costo la cantidad de vehículos de capacidad j a enviar a la ruta i (X_{ij}) se multiplica por el costo variable de camión de capacidad j (CV_j) y por el número de kilómetros que recorre en la ruta i (n_{imes}). La fórmula para esta expresión es la siguiente:

$$CUV_{ij} = \sum_{j=1}^2 X_{ij} * CV_j * n_{imes}$$

El resultado de la expresión esta en COP y la unidad es \$/km-mes.

Costo del personal de recolección: Este costo incluye el salario básico mensual $CRRH$ multiplicado por el total de camiones que se envían a la localidad i ($\sum_{j=1}^2 X_{ij}$). Así:

$$CRRHT_i = CRRH * \sum_{j=1}^2 X_{ij}$$

El resultado de la expresión está en COP y la unidad es \$/mes.

Costo operativo: Es la suma de los tres costos mencionados anteriormente, se expresa de la siguiente manera:

$$CO = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 CUF_{ij} + CUV_{ij} + CRRHT_i$$

El resultado de la expresión está en COP y la unidad es \$/mes.

Costo logístico: El proceso de recolección representa entre el 50 y 90% de los costos de un sistema de gestión de residuos (Antonio, Aguilar, Eduardo, & Zambrano, 2015). Con base en esto se dividió el costo operativo (CO) entre 0,90 para dar lugar al costo del proceso de recolección. La fórmula se muestra a continuación:

$$CL = \frac{CO}{0,90}$$

El resultado de la expresión está en COP y la unidad es \$/mes.

Costo específico: Para calcular el costo específico se debe dividir el costo logístico (CL) entre las ton/mes de basura producida por localidad, esto da como resultado el costo por tonelada en esa localidad. La fórmula es la siguiente:

$$CE = \frac{CL}{P_{mes}}$$

El resultado de la expresión esta en COP y la unidad es \$/ton-mes.

Costo anual: Este último costo representa la inversión anual del proceso de recolección, para hallarlo se multiplica el costo logístico CL por 12 que son los meses del año. La fórmula es la siguiente:

$$CT = CL * 12$$

El resultado de la expresión esta en COP y la unidad es \$/año.

En la tabla 7 se muestra cómo quedaría la tabla con la estructura de costos del modelo propuesto.

Costo de campaña de sensibilización: La campaña de sensibilización es la actividad aplicada para capacitar y enseñar a la comunidad de la ciudad de Barranquilla como deben clasificarse los residuos sólidos generados por ellos y que posteriormente son separados en el relleno sanitario para su aprovechamiento. La campaña, está prevista realizarla en un periodo de 6 meses, llegando al sector residencial y planteles educativos.

La campaña se costea para toda la ciudad, debido a que el beneficio de la actividad propuesta (clasificación de residuos desde la fuente) para ambos escenarios, tendrá repercusión de manera general, y la capacitación se hará en cada domicilio y plantel educativo de la ciudad de Barranquilla información obtenida en la página de la Alcaldía de Barranquilla. A continuación, se describe la metodología a emplear para el desarrollo de la campaña:

Sector residencial: Se van a visitar los 199.679 domicilios que tiene la ciudad (se consideran casas y apartamentos) siguiendo los lineamientos descritos a continuación:

Los domicilios se deben visitar en un periodo de tiempo de 6 meses.

Se van a contratar 100 personas para la visita de los domicilios. Cada domicilio se estima una visita de 30 minutos para su capacitación. La cantidad de domicilios visitados por las 100 personas diariamente es de 1400.

Se va a entregar publicidad educativa e informativo. Además, se va hacer entrega de 3 muestras de bolsas para cada uno de los tipos de material considerados en el proceso de separación.

Planteles educativos: Se van a visitar los 546 planteles educativos que tiene la ciudad de Barranquilla. Siguiendo los lineamientos que se describen a continuación:

Los planteles educativos se deben visitar en un periodo de tiempo de 6 meses.

Se van a contratar 2 personas para la visitar los planteles. Cada plantel educativo se estima una visita de 4 horas para su capacitación. La cantidad de planteles visitados por las 2 personas diariamente es de 2.

Se va a entregar y pegar en el plantel educativo, publicidad educativa e informativa. Además, se va hacer entrega de 100 muestras de bolsas para cada uno de los tipos de material considerados en el proceso de separación, para ser repartidos entre el personal docente y algunos

estudiantes que sirvan como multiplicadores de la información en sus comunidades y servicio social, teniendo en cuenta el número de horas asignados para los estudiantes de los últimos grados de secundaria.

Otros sectores informativos: En la ciudad se va realizar una campaña fuerte de educación en los medios de comunicación como radio, periódico, televisión y redes sociales, igualmente la instalación de vallas publicitarias y posters en lugares estratégicos de la ciudad.

Cabe resaltar, que estos costos no son incluidos en los costos operacionales del modelo propuesto, debido a que obedece a una actividad desarrollada antes de la determinación de los parámetros para cada uno de los escenarios planteados, debido a que para poder tener la utilidad máxima de cada uno de los materiales dispuestos, la comunidad debe tener conocimiento de cómo deben ser disponerse los residuos. Después de los 6 meses de enseñanza a la comunidad, se realiza un control para la población que aun presente falencias en la clasificación de estos, a partir de la estrategia de multiplicación implementada con los planteles educativos. Los valores para los recursos empleados fueron obtenidos del mercado actual a partir de los precios que se manejan.

Tabla 6.

Presupuesto de aprendizaje.

Casas		
Actividad	Valor unitario (COP)	Valor total (COP)
Elaboración de material informativo	\$ 2.000	\$ 399.358.000
Charlas educativas	\$ 800.000	\$ 480.000.000
Bolsas	\$ 15	\$ 44.927.775
Subtotal		\$ 924.285.775
Plantel educativo		
Elaboración de material informativo	\$ 2.000	\$ 1.092.000
Elaboración de pósteres	\$ 2.000	\$ 5.460.000
Elaboración de videos educativos	\$ 20.000	\$ 80.000
Charlas educativas	\$ 800.000	\$ 9.600.000
Bolsas	\$ 15	\$ 4.095.000
Subtotal		\$ 13.775.000
Publicidad urbana		
Vallas publicitarias	\$ 2.000.000	\$ 10.000.000
Difusión mediante redes sociales, periódicos, radio y televisión	\$ 20.000.000	\$ 20.000.000
Elaboración de pósteres	\$ 1.000	\$ 1.000.000
Subtotal		\$ 31.000.000
Total		\$ 969.060.775

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

Tabla 7.

Estructura de costos del modelo propuesto.

Inicio	Destino	CUFij		CUVij		CRRHTi	CO	CL	CE	CT
		CAP. 10	CAP. 15	CAP. 10	CAP. 15					
		ton	ton	ton	ton					
		\$ 3.774.434	\$ 4.774.434	\$ 5.554	\$ 8.168	Costo	Costo	Costo	Costo	Costo
						Salario del	operativo	logístico	Específico	total
						personal de	(90%)	(100%)	\$/Ton	anual
						recolección				
Aseo	Riomar									
técnico	Norte centro									
	histórico									
	Sur occidente									
	Sur oriente									
	Metropolitana									

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

3.2.3 Estructura de utilidad

La utilidad es la generación de valor por los residuos reutilizables que se obtienen en el proceso de recolección. Esta se calcula multiplicando las toneladas de material k reutilizables recolectados en la ruta i (M_{ik}) por el precio del material k (PR_k). La fórmula es la siguiente:

$$U_{ik} = \sum_{k=1}^5 M_{ik} * PR_k$$

El resultado de la expresión está en COP y la unidad es \$/ton.

Determinación de Mik: Para hallar las toneladas de material k reutilizables recolectadas en ruta i (Mik) se utilizó la información del PGIRS donde mostraba el porcentaje de material reciclado en tonelada por cada estrato. A partir de ahí fue necesario utilizar la información demográfica extraída de la página de la alcaldía, pero esta vez había que dividir las localidades en sus respectivos barrios para clasificarlos por estrato y así determinar la producción por estrato de cada localidad. Posteriormente, se suman los estratos del mismo nivel entendido que el nivel de la estratificación en Colombia va de 1 a 6 siendo 1 el más bajo, esto con el propósito de saber la producción por el nivel de estrato. Esta información fue llevada a las tablas que se muestran a continuación:

Tabla 8.

Toneladas mensuales por tipo de material en cada estrato.

	Estrato 1		Estrato 2		Estrato 3		Estrato 4		Estrato 5		Estrato 6	
Material	Peso (%)	Ton/mes	Peso (%)	Ton/mes	Peso (%)	Ton/mes	Peso (%)	Ton/mes	Peso (%)	Ton/mes	Peso (%)	Ton/mes
Papel	2,28	169	1,97	121	2,79	298	3,06	88	4,03	59	4,99	7
Cartón	4,59	340	2,57	158	3,85	411	2,58	74	3,46	50	4,97	7
Plástico	12,51	927	14,59	898	13,7	1.464	14,62	422	18,97	276	17,44	26
Vidrio	1,02	76	1,72	106	2	214	2,5	72	3,18	46	2,45	4
Textiles	4,77	353	4,36	268	4,42	472	4,63	134	5,48	80	6,22	9
Madera	0,99	73	0,68	42	1,07	114	1,26	36	1,17	17	1,93	3
Metales	1,57	116	0,63	39	1,36	145	0,39	11	2,3	33	2,66	4
Respel	3,35	248	1,28	79	0,56	60	2,29	66	1,35	20	1,42	2
Materia Orgánica	66,74	4.944	68,28	4.204	66,06	7.060	65,48	1.890	56,32	820	52,4	78
Otros	2,18	161	3,92	241	4,17	446	4,57	132	3,47	51	5,52	8
Total		7.408		6.157		10.687		2.887		1.456		148

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

Cabe aclarar que las toneladas por mes fueron halladas multiplicando la producción de todos los estratos del mismo nivel por el porcentaje establecido de cada material en la tabla y dividiendo entre 100 para convertirlo en unidades de toneladas.

Continuando con el procedimiento, ahora que se sabe las toneladas mensuales por tipo de material según estrato, hay que diseñar otras tablas donde se registre la cantidad de basura según el estrato por cada localidad. A continuación, se muestra la tabla:

Tabla 9.

Toneladas mensuales producidas en cada localidad por estrato.

Localidades	Estrato 1 Ton/mes	Estrato 2 Ton/mes	Estrato 3 Ton/mes	Estrato 4 Ton/mes	Estrato 5 Ton/mes	Estrato 6 Ton/mes
Riomar	0	274	314	299	829	66
Norte centro histórico	0	0	2075	1868	631	83
Sur occidente	633	2640	4830	681	0	0
Metropolitana	3621	1526	804	0	0	0
Sur oriente	3154	1717	2667	0	0	0
Total	7.408	6.157	10.690	2.848	1.460	149

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

El siguiente paso por realizar es relacionar los dos tipos de tabla anteriores según su estrato mediante una regla de tres simple la cual desea determinar la cantidad de basura por tipo de material de cada localidad en cada estrato. La regla de tres se representa como sigue:

$$M_{ik} = \frac{M_{iz} * M_{kz}}{M_z}$$

Donde:

M_{iz} = toneladas de residuos del estrato z producido en la localidad i

M_{kz} =toneladas de material tipo k producido en el estrato z

M_i =toneladas de material para el estrato i

Finalmente se obtiene la siguiente tabla donde se muestra claramente la producción de toneladas por tipo de material, no por estrato sino por localidad.

Tabla 10.

Resumen en toneladas mensuales de material por tipo de material en cada localidad.

	Riomar	Norte centro histórico	Sur occidente	Metropolitana	Sur oriente
Material	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes
Papel	60	145	222	135	180
Cartón	59	155	301	236	292
Plástico	296	695	1.227	786	1.010
Vidrio	46	111	166	79	115
Textiles	89	219	391	275	343
Madera	20	55	85	55	71
Metales	28	52	95	77	97
Respel	24	65	98	145	143
Materia Orgánica	1.094	3.008	5.866	3.989	5.039
Otros	70	199	350	172	247
Total	1.786	4.704	8.799	5.950	7.537

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

Determinación de PRk: Los precios fueron determinados consultando fuentes confiables, empresas comercializadoras y la empresa encargada del proceso de recolección en la ciudad de Barranquilla. No obstante, solo se tienen en cuenta los precios de materiales reutilizables como son: vidrio (\$50/ Kg), papel (\$70/ Kg), plástico (\$500/ kg), cartón (\$120/ kg) y los metales (\$1000/ Kg) como el aluminio que es el más cotizado según las personas del gremio reciclador. Los demás materiales, aunque pueden ser reutilizados, según las fuentes consultadas no es tan común la compra de esos materiales. Lo anterior se sustenta, en que la empresa que se encarga del proceso de recolección de residuos en Barranquilla, la materia orgánica es utilizada para la quema de los lixiviados y el respel es separado para hacerle un tratamiento especial. Por otro lado, la madera y los textiles requieren tener condiciones específicas para su reutilización las cuales resultan difíciles de identificar por parte de los consumidores.

Cabe aclarar que para el modelo propuesto los precios de los materiales reutilizables se convertirán de pesos por kilogramo (\$/kg) a pesos por tonelada (\$/ton).

En la tabla 11 se muestra la estructura de la utilidad en el modelo propuesto.

Tabla 11.

Estructura de utilidad del modelo. Elaborado por: Autores

		Mik					PRk					Uik					
		Cantidad de materiales generados (unidad de peso)					Plástico	Papel	Cartón	Metal	Vidrio						
Inicio	Destino	Plástico	Papel	Cartón	Metal	Vidrio	\$	500.000	\$	70.000	\$	120.000	\$	1.000.000	\$	50.000	Utilidad total anual
Aseo técnico	Riomar																
	Norte centro																
	histórico																
	Sur occidente																
	Sur oriente																
	Metropolitana																

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

Finalmente se resumen los parámetros y variables empleados para caracterizar el modelo de recolección propuesto en la tabla

*i= 1, 2, 3, 4, 5; Las cinco rutas disponibles

*j=1, 2; La capacidad de los camiones

*k=1, 2, 3, 4, 5; Los tipos de residuos recolectados

*z=1, 2, 3, 4, 5, 6: Los estratos domiciliarios

Tabla 12.

Resumen parámetros del modelo propuesto.

Nombre	Abreviatura	Fuente	Unidad
Número de kilómetros rodovianos	n_{imes}	$n_{imes} = d_i * f * 4$	Km/mes
Distancia de la ruta	d_i	Tomado de Google Maps	Km/viaje
Frecuencia de recolección	f	PPS 2016 ³	Veces/semana
Producción de basura por ruta	P_{imes}	$P_{imes} = N_i * PPC * 30/1000$	Ton/mes
Número de personas en la ruta	N_i	Alcaldía de Barranquilla	Unidad
Índice de producción percapita	PPC	PGIRS 2015	Kg/Hab-día

³ PPS: Programa de prestación de servicio de aseo (2016)

$m_{mes} = v * f * 4$			
Número de viajes	m_{mes}		Veces/mes
Numero de despacho de camiones	v	PGIRS 2015	Veces/día
Verificación de capacidad	CAP_{imes}	$CAP_{imes} = (\sum_{j=1}^2 CAP_j * X_{ij}) * m_{mes} \geq P_{imes}$	Ton/mes
Número de vehículos enviados	X_{ij}	Propia	unidad
Capacidad del vehículo	CAP_j	FTC 2016 ⁴	Ton
Costo fijo de utilización de vehículo	CUF_{ij}	$CUF_{ij} = \sum_{j=1}^2 X_{ij} * CF_j$	\$/mes
Costo fijo del vehículo	CF_j	$CF_j = \sum_{j=1}^2 C_{dj} + C_{rj} + C_{sj} + C_{pj}$	\$/mes
Costo depreciación vehículo	C_{dj}	Ministerio de transporte ⁵	\$/mes

⁴ FTC: Ficha técnica compactadores (2013)

⁵ Ministerio de transporte: Estructura de costos vehicular (2006).

Costo de rodamiento	C_{rj}	Ministerio de transporte	\$/mes
Costo del SOAT	C_{sj}	Tarifas SOAT 2017	\$/mes
Costo de parqueo	C_{pj}	Ministerio de transporte	\$/mes
Costo variable de utilización de vehículo	CUV_{ij}	$CUV_{ij} = \sum_{j=1}^2 X_{ij} * CV_j * n_{imes}$	\$/Km-mes
Costo variable del vehículo	CV_j	$CV_j = \sum_{j=1}^2 C_{jm} + C_{jnr} + C_{jc} + C_{jli} + C_{jlu}$	\$/Km
Costo de mantenimiento vehículo	C_{jm}	Ministerio de transporte	\$/km
Costo de neumáticos y reparación	C_{nr}	EMSER ESP. ⁶	\$/km
Costo de combustible	C_{jc}	EMSER ESP.	\$/km
Costo de limpieza vehículo	C_{li}	EMSER ESP	\$/km
Costo de lubricación vehículo	C_{lu}	EMSER ESP	\$/km
Salario personal de recolección	$CRRH$	$CRRH = C_{con} + C_{Ay1} + C_{Ay2}$	\$/mes

⁶ EMSER ESP: Análisis financiero para la compra de un vehículo compactador de residuos sólidos en la EMSER ESP. (2014).

Salario conductor	C_{con}	EMSER ESP	\$/mes
-------------------	-----------	-----------	--------

Salario ayudante 1	C_{Ay1}	EMSER ESP	\$/mes
--------------------	-----------	-----------	--------

Salario ayudante 2	C_{Ay2}	EMSER ESP	\$/mes
--------------------	-----------	-----------	--------

Costo operativo	CO	$CO = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 CUF_{ij} + CUV_{ij} + CRRH$	\$/mes
-----------------	----	---	--------

Costo salario personal de recolección	$CRRHT_i$	$CRRHT_i = CRRH * \sum_{j=1}^2 X_{ij}$	\$/mes
---------------------------------------	-----------	--	--------

Costo logístico	CL	$CL = \frac{CO}{0,90}$	\$/mes
-----------------	----	------------------------	--------

Costo específico	CE	$CE = \frac{CL}{P_{imes}}$	\$/ton
------------------	----	----------------------------	--------

Costo total anual	CT	$CT = CL * 12$	\$/año
-------------------	----	----------------	--------

Utilidad por reutilización	U_{ik}	$U_{ik} = \sum_{k=1}^5 M_{ik} * PR_k$	\$/mes
Cantidad de material producido por ruta	M_{ik}	$M_{ik} = \frac{M_{iz} * M_{kz}}{M_z}$	Ton/mes
Precio de material	P_{rk}	Propia	\$/Ton

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

3.3 Escenarios

Después de haber hecho el modelo propuesto, se propone crear el escenario actual y dos escenarios alternativos los cuales son igualmente modelados usando el modelo propuesto, para analizar sus resultados y así determinar cuál optimiza mejor el proceso de recolección domiciliaria. Estos escenarios fueron diseñados considerando los parámetros y la estructura básica de costos y estimación de utilidades del modelo propuesto, de manera que se pueda medir el desempeño de uno sobre otro.

3.3.1 Escenario Actual

En el escenario actual representa el estado actual del proceso de recolección domiciliaria en Barranquilla, así mismo será la base para los demás escenarios que busquen mejorar los costos y utilidades del mismo.

Estructura básica del escenario actual

En la tabla 13 se puede apreciar cómo queda la estructura básica del modelo actual teniendo en cuenta la información obtenida para el mismo.

Tabla 13.

Estructura básica del escenario actual.

		Xij				CAPimes ≥ Pimes					
		i	Nimes	Pimes	mimes	N° Camiones asignados		Verificación de capacidad por tipo de camión mensual			
Inicio	Destino	Ruta	No km rodoviarios mensual	Producción ton/mes de basura	No de viajes en el mes	CAP. 10 TON	CAP. 15 TON	CAP. 10 TON	CAP. 15 TON	Total	Confirmación
Aseo técnico	Riomar	1	1077,6	1.784	24,00	3	3	720	1.080	1.800	abastece
	Norte centro histórico	2	835,2	4.680	24,00	3	11	720	3.960	4.680	abastece
	Sur occidente	3	970,8	8.791	24,00	4	22	960	7.920	8.880	abastece
	Sur oriente	4	980,4	7.538	24,00	5	18	1.200	6.480	7.680	abastece
	Metropolitana	5	982,8	5.950	24,00	3	15	720	5.400	6.120	abastece

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

Estructura de costos del modelo actual

En la tabla 14 se puede apreciar los costos del modelo actual.

Tabla 14.

Estructura de costos del escenario actual.

Inicio	Destino	CUFij		CUVij		CRRHTi	CO	CL	CE	CT
		CAP. 10 ton	CAP. 15 ton	CAP. 10 TON	CAP. 15 TON					
		\$ 3.774.434	\$ 4.774.434	\$ 5.554	\$ 8.168					
						Costo Salario del personal de recolección	Costo operativo (90%)	Costo Logístico (100%)	Costo Especifico \$/Ton	Costo total anual
Aseo técnico	Riomar	\$ 11.323.301	\$ 14.323.301	\$ 17.955.541	\$ 26.405.207,500	\$ 24.594.488	\$ 94.601.838	\$ 105.113.153	\$ 58.920	\$ 1.261.357.834,67
	Norte centro histórico	\$ 11.323.301	\$ 52.518.769	\$ 13.916.544	\$ 75.040.188,797	\$ 57.387.139	\$ 210.185.941	\$ 233.539.934	\$ 49.902	\$ 2.802.479.207,58
	Sur occidente	\$ 15.097.734	\$ 105.037.537	\$ 21.567.977	\$ 174.446.875,681	\$ 106.576.115	\$ 422.726.239	\$ 469.695.821	\$ 53.429	\$ 5.636.349.849,40
	Sur oriente	\$ 18.872.168	\$ 85.939.803	\$ 27.226.572	\$ 144.140.676,130	\$ 94.278.871	\$ 370.458.089	\$ 411.620.099	\$ 54.606	\$ 4.939.441.192,73
	Metropolitana	\$ 11.323.301	\$ 71.616.503	\$ 16.375.933	\$ 120.411.274,736	\$ 73.783.464	\$ 293.510.475	\$ 326.122.750	\$ 54.811	\$ 3.913.473.001,33

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

Utilidades del modelo actual

En este apartado no es necesario mostrar la estructura de utilidades debido a que en el modelo actual no hay algún método para el aprovechamiento de los residuos, lo que conlleva a que los residuos recolectados no generen valor alguno. De ahí que la utilidad total sea cero.

3.3.2 Escenario 1

Este escenario se propuso para mejorar las utilidades mediante la separación de residuos desde la fuente, de modo que se clasifiquen los materiales que son aprovechables como el plástico, vidrio, cartón, metales, aluminio y el papel.

En este orden de ideas la variación de este modelo radica en la estimación de la utilidad ya que se saca provecho de los residuos reutilizables. Cabe recordar que esta información de las cantidades por tipo de material en cada ruta asignada se extrae de la tabla 21.

Por otro lado, la estructura básica y la estructura de costos no recibieron cambio alguno por hacer uso del mismo tipo de vehículo para ambos escenarios, debido a que como se puede analizar en la caracterización del proceso, en el relleno sanitario donde son depositados estos residuos se encuentra personal destinado a la clasificación de los mismos, este mismo personal puede clasificar los residuos antes que se haga la disposición final de los mismos y sellado del vaso en donde son depositados. Los residuos clasificados en el relleno sanitario se someten al tratamiento o aprovechamiento de los mismos a partir de los procesos de la empresa recolectora y/o de sus aliados estratégicos. Para ello, los residuos deben disponerse desde la fuente en las bolsas del color (establecidos en la campaña desarrollada) indicado, facilitando la identificación y clasificación de los mismos en el relleno sanitario.

En cuanto a las utilidades para este escenario se pueden observar en la tabla 15 como sigue:

Tabla 15.

Estructura de utilidad del escenario 1.

		Mik					PRk					Uik
		Cantidad de materiales generados (unidad de peso)					Plástico	Papel	Cartón	Metal	Vidrio	
Inicio	Destino	Plástico	Papel	Cartón	Metal	Vidrio	\$ 500.000	\$ 70.000	\$ 120.000	\$ 1.000.000	\$ 50.000	Utilidad total anual
Aseo técnico	Riomar	296	60	59	28	46	\$ 148.000.000,000	\$ 4.200.000,000	\$ 7.080.000,000	\$ 28.000.000,000	\$ 2.300.000,000	\$ 2.274.960.000,000
	Norte centro histórico	691	145	154	52	110	\$ 345.500.000,000	\$ 10.150.000,000	\$ 18.480.000,000	\$ 52.000.000,000	\$ 5.500.000,000	\$ 5.179.560.000,000
	Sur occidente	1225	222	300	95	165	\$ 612.500.000,000	\$ 15.540.000,000	\$ 36.000.000,000	\$ 95.000.000,000	\$ 8.250.000,000	\$ 9.207.480.000,000
	Sur oriente	1010	180	292	97	115	\$ 505.000.000,000	\$ 12.600.000,000	\$ 35.040.000,000	\$ 97.000.000,000	\$ 5.750.000,000	\$ 7.864.680.000,000
	Metropolitan a	786	135	236	77	79	\$ 393.000.000,000	\$ 9.450.000,000	\$ 28.320.000,000	\$ 77.000.000,000	\$ 3.950.000,000	\$ 6.140.640.000,000

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

3.3.3 Escenario 2

El escenario 2 fue creado con el propósito de mejorar el escenario actual y por consiguiente el escenario 1, dado que en los otros dos no se contempla una reducción de costos. Es por ello que para reducir los costos de recolección se decide aumentar la frecuencia (f) de 3 a 6 veces por semana, entendida como las veces que el compactador trabaja por semana para satisfacer la demanda de cada localidad, lo que obliga a aumentar la cantidad de viajes mensuales ($m_{mes} = v * f * 4$). El cambio en este parámetro afecta la cantidad de kilómetros rodoviarios mensuales ($n_{imes} = di * f * 4$) porque se recorren más kilómetros, cabe aclarar que los compactadores cuentan con una capacidad instalada, por lo que es necesario hacer dos recorridos. Del mismo modo, ahora se requieren menos vehículos para satisfacer las necesidades de cada localidad.

Teniendo en cuenta lo planteado en el marco de ideas anterior, se va hacer una muestra del escenario 2, en tres partes:

Estructura básica del modelo

Estructura de costos para el escenario 2.

Utilidades del escenario.

En la tabla 16 se muestra la variación en la estructura básica del modelo por el aumento en la frecuencia de recolección.

Tabla 16.

Estructura básica del escenario 2.

						Xij		CAPimes ≥ Pimes			
		i	nimes	Pimes	mimes	N° Camiones asignados		Verificación de capacidad por tipo de camión mensual			
Inicio	Destino	Ruta	No km rodoviarios mensual	Producción ton/mes de basura	No de viajes en el mes	CAP. 10 TON	CAP. 15 TON	CAP. 10 TON	CAP. 15 TON	Total	Confirmación
Aseo técnico	Riomar	1	2155,2	1.784	48,00	4	0	1.920	-	1.920	abastece
	Norte centro histórico	2	1670,4	4.680	48,00	10	0	4.800	-	4.800	abastece
	Sur occidente	3	1941,6	8.791	48,00	5	9	2.400	6.480	8.880	abastece
	Sur oriente	4	1960,8	7.538	48,00	7	6	3.360	4.320	7.680	abastece
	Metropolitana	5	1965,8	5.920	48,00	4	6	1.920	4.320	6.240	abastece

Nota. Elaborado por: Autores. 2017

Estructura de costos del escenario 2

La estructura de costos también tuvo variación debido a la cantidad de kilómetros que se recorren. Es decir, entre más kilómetros se recorran los costos variables van a aumentar, pero también se disminuyó la cantidad de vehículos que amortizan los costos variables. En la tabla 17 se muestra la nueva estructura de costos para el escenario 2.

Las utilidades para el escenario 2 son iguales a la del escenario 1 porque no se varió nada que afecte las mismas, es decir, la cantidad de material producido en cada una de las localidades sigue siendo igual.

Tabla 17.

Estructura de costos del escenario 2.

		CUFij		CUVij		CRRHTi	CO	CL	CE	CT
		CAP. 10 TON	CAP. 15 TON	CAP. 10 TON	CAP. 15 TON					
Inicio	Destino	\$ 5.347.730	\$ 6.347.730	\$ 2.723	\$ 4.084	Costo Salario del personal de recolección	Costo operativo (90%)	Costo Logístico (100%)	Costo Especifico \$/Ton	Costo total (anual)
Aseo técnico	Riomar	\$ 21.390.918	\$ -	\$ 23.473.474	\$ -	\$ 16.396.325	\$ 61.260.717	\$ 68.067.464	\$ 38.154	\$ 816.809.562,66
	Norte centro histórico	\$ 53.477.295	\$ -	\$ 45.483.123	\$ -	\$ 40.990.813	\$ 139.951.231	\$ 155.501.368	\$ 33.227	\$ 1.866.016.418,86
	Sur occidente	\$ 26.738.648	\$ 57.129.566	\$ 26.433.798	\$ 71.371.254,128	\$ 57.387.139	\$ 239.060.404	\$ 265.622.671	\$ 30.215	\$ 3.187.472.048,27
	Sur oriente	\$ 37.434.107	\$ 38.086.377	\$ 37.373.273	\$ 48.051.351,152	\$ 53.288.057	\$ 214.233.165	\$ 238.036.850	\$ 31.578	\$ 2.856.442.201,37
	Metropolitana	\$ 21.390.918	\$ 38.086.377	\$ 21.408.436	\$ 48.168.979,918	\$ 40.990.813	\$ 170.045.524	\$ 188.939.471	\$ 31.755	\$ 2.267.273.650,28

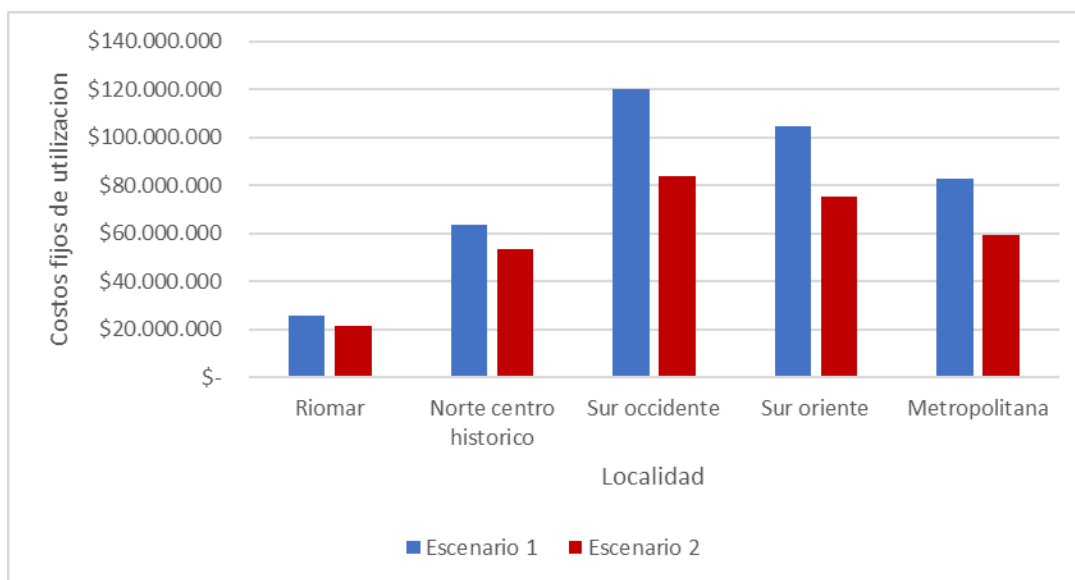
Nota. Elaborado por: Autores. 2017

3.4 Resultados

Para evaluar el desempeño de los escenarios propuestos se han elegido como indicadores el costo y la utilidad de cada escenario. Para evaluar el costo se han desglosado los mismos, correspondientes al proceso de recolección, a fin de evaluar los resultados de ambos escenarios.

Es importante aclarar que, aunque el escenario actual no se encuentre explícito en la comparación, si se está considerando pues en materia de costos los resultados son iguales al escenario 1.

Figura 20.

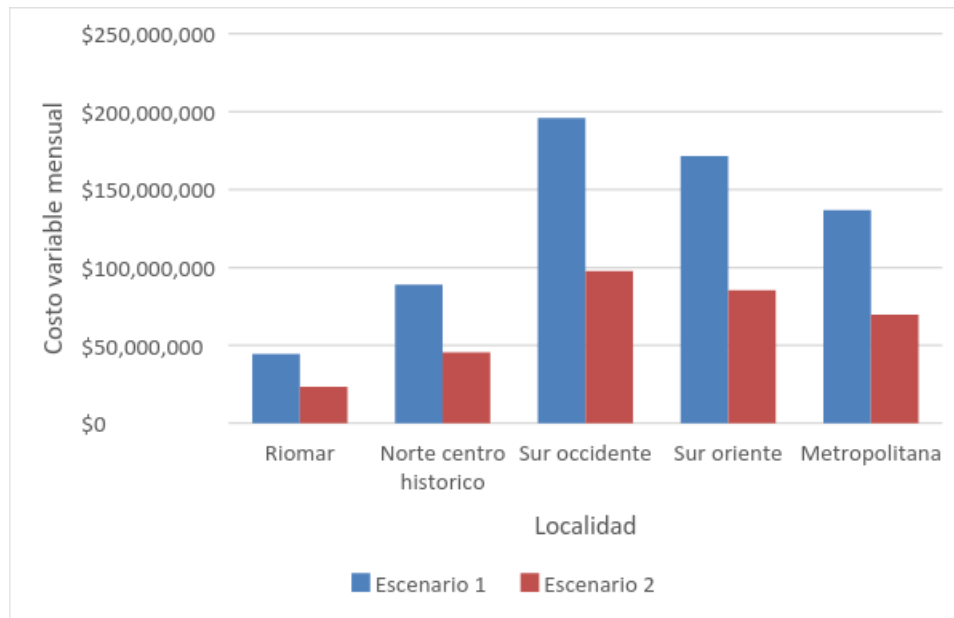


Nota. Elaborado por: Autores. 2017

La figura 20 muestra que el escenario 1 tiene una mayor tasa de utilización de los vehículos asignados por localidad, lo que hace alusión a que los costos fijos incrementen en mayor proporción que los del escenario 2. Además, se puede observar que la localidad suroccidente representa la mayor tasa de utilización para ambos escenarios, mientras que la menor tasa de utilización la tiene Riomar. Este hecho se debe a que Riomar es una de las localidades que menos

basura produce por mes, por ende, una flota menor de vehículos puede abastecer esa zona sin problemas, lo contrario a la localidad suroccidente, que tiene la mayor cantidad de residuos sólidos domiciliarios.

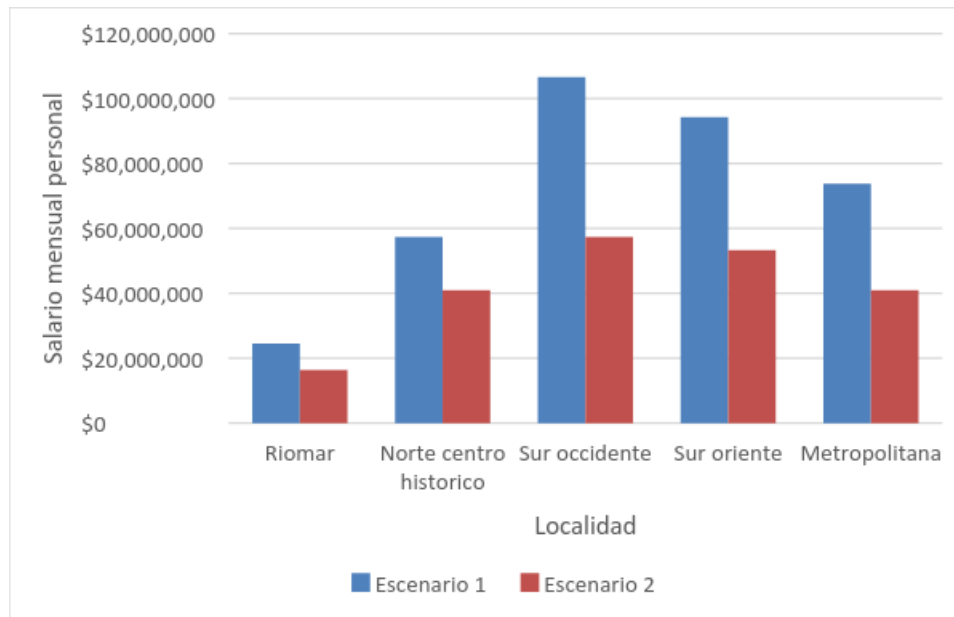
Figura 21.



Nota. Elaborado por: Autores. 2017

Con base en la figura 21 se puede deducir que el escenario 1 es quien posee la mayor tasa de costos variables. Además, la localidad para ambos escenarios que presenta los mayores costos variables es sur occidente, por el contrario, la que tiene menor tasa es Riomar. Este hecho se debe a que se envían menos vehículos a Riomar que a sur occidente porque la producción de basura es menor.

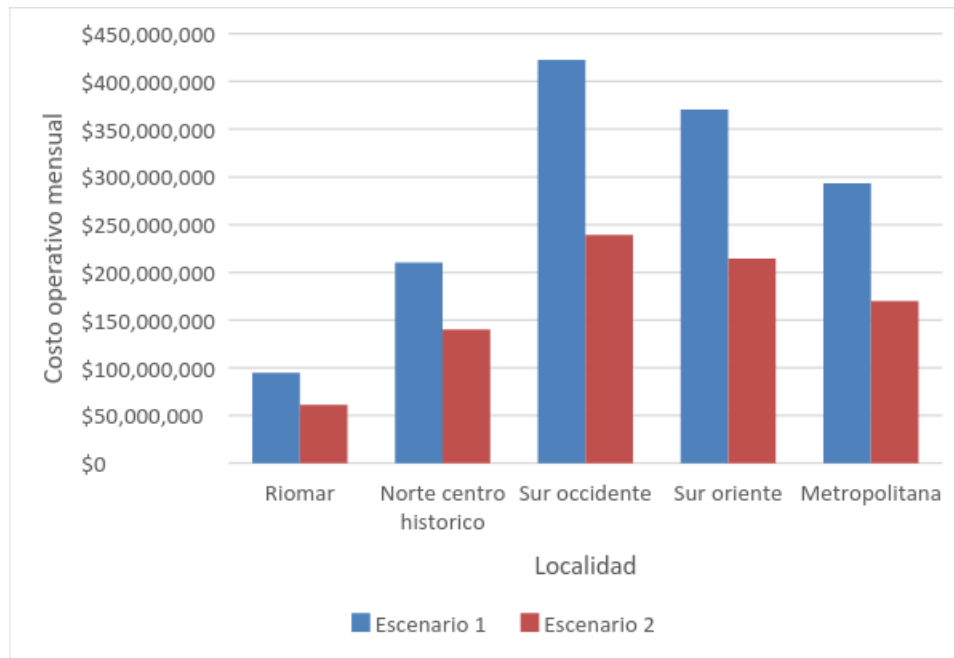
Figura 22.



Nota. Elaborado por: Autores. 2017

En la figura 22 se puede observar que el salario del personal de recolección en el escenario 1 es mayor que en el 2 para todas las localidades, y el costo salarial de suroccidente es el mayor de todas las localidades, mientras que el menor es el de Riomar. Este comportamiento está dado por la cantidad de vehículos asignados para el escenario 1 y 2, asimismo para las localidades restantes. Mientras más vehículos existan en el proceso de recolección de residuos sólidos, más contrataciones de personal se deben hacer.

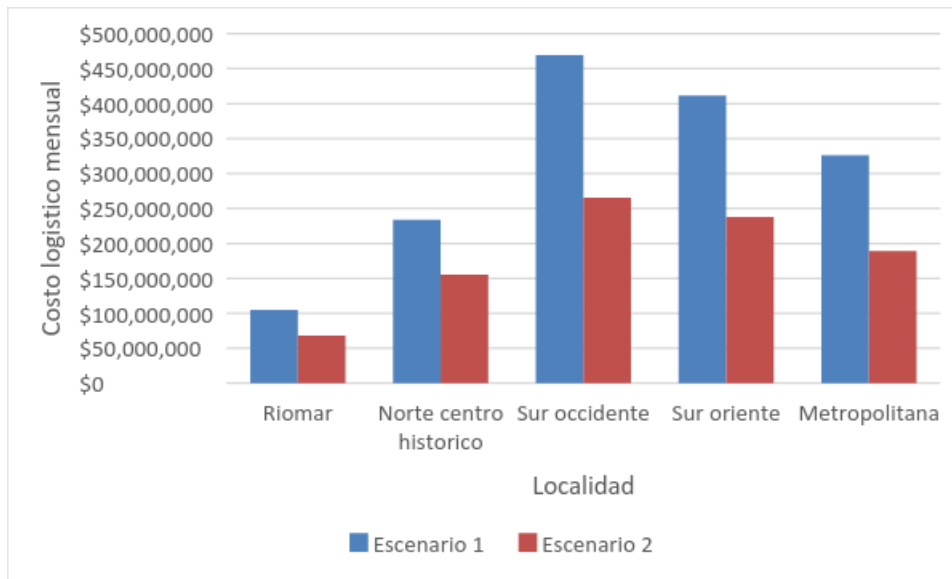
Figura 23.



Nota. Elaborado por: Autores. 2017

De la figura 23 se puede decir que el costo operativo es mayor en el escenario 1 que en el escenario 2 porque para los costos mencionados anteriormente prevalece el escenario 1 como el que más genera costo mientras que el escenario 2 se mantiene menor. Del mismo modo la localidad que más genera costos es la Sur Occidente y la que menos genera es Riomar.

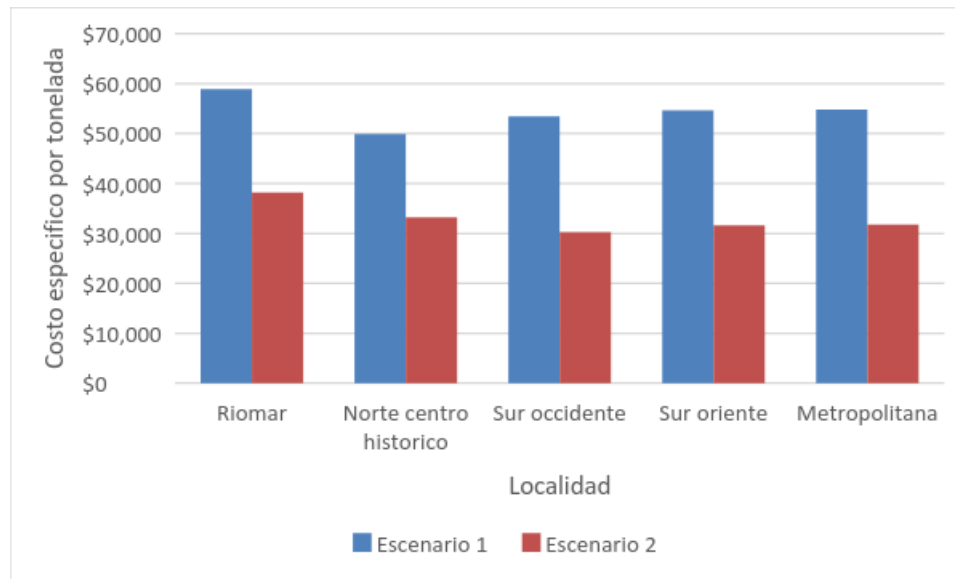
Figura 24.



Nota. Elaborado por: Autores. 2017

Tal como se dijo en la figura 23, en la tabla 24, se detallan los costos totales o logísticos del proceso de recolección, estimando que los costos operativos enfocados principalmente a la parte de transporte corresponden al 90% del proceso de recolección de residuos, mientras que el otro 10% se deja como otros costos que no se consideran directos para el proceso objeto de estudio, pero igualmente hacen parte del costo de recolección. Como se puede observar sigue la tendencia a que los costos del escenario 1 son mayores que los del escenario 2 y la localidad que más genera es la Sur Occidente, y la menor generación es la localidad Riomar.

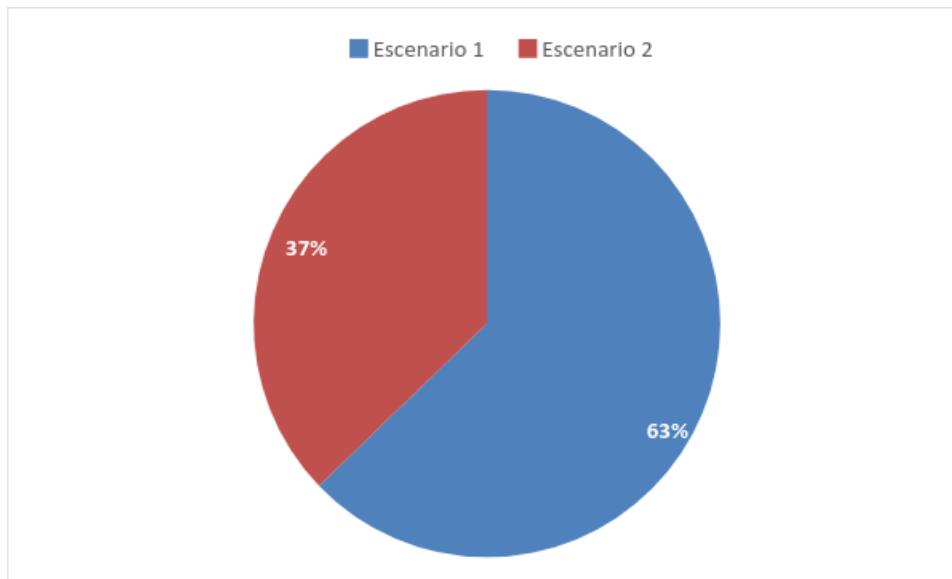
Figura 25.



Nota. Elaborado por: Autores. 2017

La figura 25 muestra el costo por tonelada de material (\$/ton) en cada escenario y localidad. El precio por transportar 1 tonelada en el escenario 1 es mayor al del escenario 2, debido a que los costos logísticos son mayores en el escenario 1. Sin embargo, analizando las localidades se puede decir que la localidad Riomar tiene un mayor costo por tonelada, mientras que la Sur Occidente tiene un menor costo por tonelada. De esto se puede deducir, que el costo específico presenta una relación inversa, es decir que entre mayor sea el costo logístico y menor sea la producción de la localidad, entonces mayor será el valor de la tonelada transportada. No obstante, unitariamente puede verse mayor pero cuando se multiplica por el número de toneladas, el costo de suroccidente sigue siendo mayor que el de Riomar, como se ha podido analizar en las demás gráficas.

Figura 26.



Nota. Elaborado por: Autores. 2017

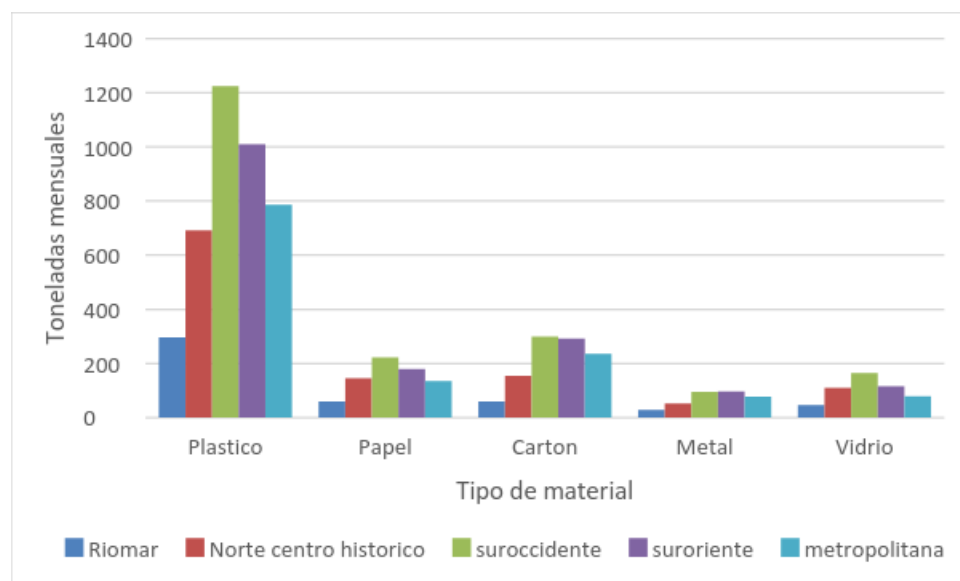
La figura 26 muestra los porcentajes de costos totales anuales para cada escenario, donde se puede apreciar que el costo del escenario 1 es superior en un 26% al escenario 2 lo que muestra prácticamente lo óptimo que es el modelo en términos de costos.

Finalmente, para terminar con los costos de recolección se puede decir que hay dos parámetros que son los responsables de que se de esta situación, estos son: las toneladas mensuales producidas por localidad y el número de vehículos. La asignación de los vehículos está ligada directamente con la producción de basura de cada zona, por ende si una varía la otra también, es decir, por lógica se deben enviar más vehículos a una localidad cuando esta tiene mayores necesidades; como lo aplicado en el escenario 2, se aumentó la frecuencia de 3 a 6 siendo posible utilizar menos vehículos para cubrir una localidad, lo que hizo que los costos de recolección que están en función del número de vehículos disminuyera gradualmente para este escenario, haciéndolo mucho más económico que el escenario 1.

Otro de los indicadores elegido para mostrar la eficiencia de los escenarios respecto al actual fue la utilidad, ya que el modelo actual no cuenta con la generación de utilidades por la separación y aprovechamiento para reutilización de los residuos; lo que la hace menos atractiva debido a que esto añade mucho valor al proceso de recolección domiciliaria.

Valga nuevamente la aclaración al igual que en el apartado anterior de los costos, el escenario actual no cuenta con utilidad por ende visualizarlo en este apartado no es necesario.

Figura 27.

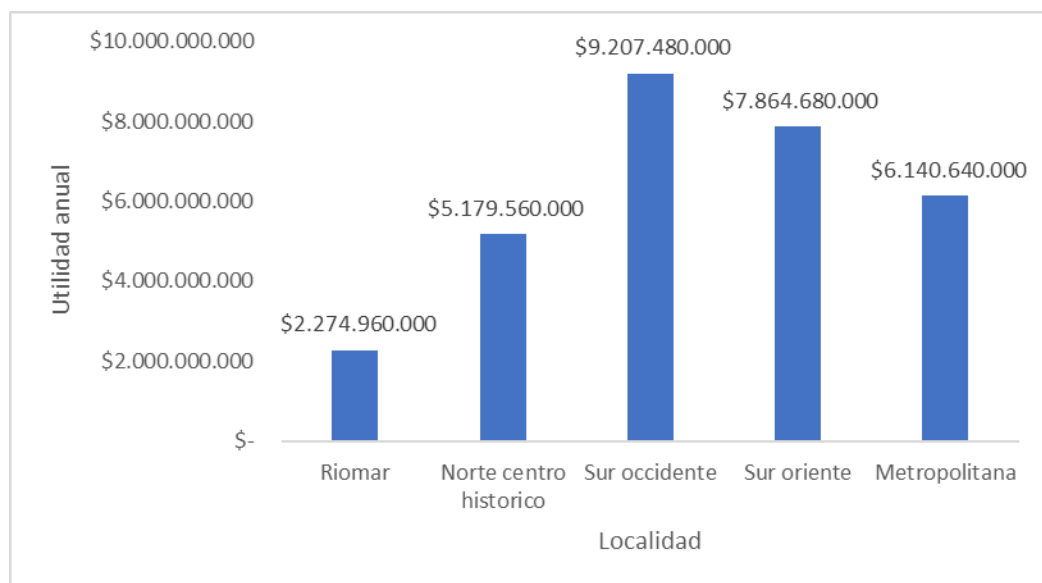


Nota. Elaborado por: Autores. 2017

La figura 27 permite ver la distribución de los materiales reutilizables por localidad y de ella se puede inferir que el material que más se produce es el plástico, seguido del cartón, luego el papel, en penúltimo lugar el vidrio y por último los metales como el aluminio. Además, se puede apreciar que la localidad que más genera este tipo de residuos reutilizables es la Sur Occidente, mientras que Riomar es la que menos produce. Este hecho se puede explicar porque la producción de basura ton/mes en suroccidente es la mayor de todas con 8.791 toneladas

mensuales como se muestra en la tabla 11, mientras que Riomar produce tan solo 1.784 toneladas mensuales. También se puede inferir que se debe a las diferencias socioeconómicas de las localidades, específicamente al comportamiento de cada una de ellas al momento de consumir.

Figura 28.



Nota. Elaborado por: Autores. 2017

De la figura 28 se puede afirmar que sur occidente es la localidad que mayor aporta utilidades dado a que genera la mayor cantidad de residuos sólidos aprovechables susceptibles a ser reutilizados. También se puede inferir que entre menor sea la condición socioeconómica, mayor cantidad de residuos se producen, esto se puede comprobar al analizar la figura 25, donde las localidades con barrios de menor estrato socioeconómico son los que más utilidad generan para el plan de recolección propuesto.

A manera de síntesis de resultados, el modelo desarrollado permite calcular los costos de recolección domiciliaria, además de ser flexible porque como se nota, las fórmulas utilizadas

para calcular estos costos sirven para cualquiera de los escenarios, lo que hace al modelo práctico y versátil, permitiendo variar los valores de algunos parámetros en busca de mejores soluciones para reducir los costos de recolección y la aplicación del mismo para medir otros posibles escenarios que se generen a raíz del desarrollado actualmente en la ciudad de Barranquilla en busca de mejora.

Una ventaja fundamental es que el modelo puede ser adaptado como se hizo en el modelo 1 y 2 para incluir las cantidades de residuos recuperables por zona y por tipo de material, de esta manera se calcula la utilidad proveniente de la separación de residuos en la fuente en dos o más fracciones.

Al observar los resultados del modelo empleado en los 3 escenarios se puede observar que el modelo actual es el más ineficiente por no contar con una metodología de separación de los residuos en la fuente y utilizar gran parte de la flota para satisfacer la necesidad de las zonas. Como consecuencia no se genera valor por las toneladas de residuos reutilizables recolectados, y se generan grandes costos por el uso de numerosos vehículos. Por ello, para disminuir el costo generado por el uso de vehículos, se diseñó el escenario 2 donde la frecuencia de recolección de residuos domiciliarios paso de 3 a 6 veces en la semana, es decir, se duplico, con el propósito de aumentar los viajes que realiza cada vehículo; aunque hubo un aumento en los costos variables por el aumento en el número de kilómetros rodoviarios, tiene mayor incidencia sobre los costos la disminución de la cantidad de vehículos asignados por zona.

El modelo emplea costos fijos y variables. Entre los fijos encontramos los vehículos y contratación de personal. Entre los variables, los gastos de reparación, mantenimiento y limpieza de vehículos.

Cambiando los parámetros de entrada, el modelo de costos se convierte en un elemento de gran apoyo al momento de tomar decisiones sobre el proceso de recolección domiciliaria teniendo en cuenta la metodología y cada uno de sus componentes. De ahí que se propongan las siguientes estrategias de mejora para el proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios actual en la ciudad de Barranquilla:

Implementar la separación de residuos sólidos domiciliarios desde la fuente, es decir, desde la población usuaria, que en este caso corresponde a las casas y/o apartamentos de la ciudad de Barranquilla.

Aumentar el nivel investigativo de las empresas encargadas del proceso de recolección de residuos domiciliarios a fin de evidenciar las falencias en el campo logístico desde el inicio del proceso en la actividad del transporte hasta la implementación del flujo inverso.

Estudiar tanto la frecuencia de recolección de residuos sólidos domiciliarios en la ciudad como el número de vehículos asignados a cada zona según su capacidad.

Planificar el flujo inverso de los residuos sólidos domiciliarios, tanto aprovechables como no aprovechables, aprovechando los volúmenes de residuos generados en la ciudad para la reutilización de los mismos y la implementación de procesos como la generación de energía que permitan un mayor grado de innovación que la quema de lixiviados.

Estandarizar actividades del proceso como los tiempos entre paradas de vehículos y su relación con el consumo de combustible podría ayudar a la reducción de costos significativamente.

Tomar como referencia modelos de países desarrollados en la materia, específicamente en el aspecto del transporte para reducir los costos, un ejemplo de ello podría ser el reemplazo del gran número de vehículos por otro medio de transporte que alimenten centros de acopio y a su vez

rutas selectivas, con el fin optimizar el proceso no solo por reducir costos sino por generar utilidades a través del aprovechamiento de los mismos.

Como estrategia de apoyo e incentivo, se puede suprimir una de las tarifas que componen el valor total de la prestación del servicio de recolección de residuos sólidos, motivando a la comunidad a participar activamente en el flujo inverso de los mismos.

Realización de proyectos como la formalización del gremio reciclador o responsabilidad social y ambiental con los mismos y la sociedad, a partir de las utilidades obtenidas por el aprovechamiento de los residuos.

Fortalecer y apoyar el nacimiento de centros de acopio en la ciudad en aras de propiciar cultura ambiental y tratamiento de residuos sólidos desde las pequeñas empresas.

Realizar acompañamiento a la población domiciliaria a través de la realización de campañas en los barrios de la ciudad y educación por medio de ilustraciones en las facturas de la prestación del servicio.

Fortalecer el acompañamiento y educación ambiental desde las instituciones educativas de educación básica, media y superior.

Buscar apoyo con entes gubernamentales a fin de implementar leyes en pro de la separación de los residuos sólidos desde la fuente.

Actualizar toda la información de suma importancia, como el número de centros de acopio pequeños, medianos y grandes de la ciudad, el número de recicladores de oficio, el número de botaderos a cielo abierto, entre otros aspectos que se alimentan de los residuos sólidos domiciliarios. Lo anterior con el fin poder ejecutar de manera adecuada el PGIRS contemplado por los entes encargados desde el 2016 hasta el 2027 y por supuesto acaparar desde la recolección de residuos el tratamiento de los aspectos críticos mencionados.

4. Conclusiones

A lo largo de esta investigación, se confirmó que el proceso actual de recolección domiciliar en Barranquilla necesita ser optimizado y/o mejorado. Son varios los aspectos y variables (falta de aprovechamiento de residuos y del flujo inverso, desactualización de número de recicladores y puntos de acopio de la ciudad, entre otros) de estudio que ocasionan altos costos en el proceso de recolección y falta de conciencia ciudadana hacia la recolección y cuidado del medio ambiente.

Antes de empezar con el desarrollo de las posibles soluciones fue necesario entender el proceso y a partir de ello crear una tabla donde se mostrarán los parámetros y componentes básicos del proceso de recolección. Dentro de los parámetros básicos se encontró la ruta asignada conformada por un punto de inicio y uno de llegada, el tipo de vehículo usado para la recolección, los kilómetros a recorrer mensualmente para llegar a los destinos, la producción ton/mes por ruta o localidad, el número de viajes que realiza cada vehículo en el mes, la cantidad de camiones asignados a cada ruta y la verificación de capacidad.

En este orden de ideas, los parámetros fueron organizados y usados a partir del modelo propuesto, con el fin de calcular los costos del proceso de recolección y la utilidad por el aprovechamiento de los residuos sólidos reutilizables considerados en el presente proyecto, gracias a la estrategia propuesta para los escenarios: clasificar los residuos desde la fuente.

Por medio de la implementación del modelo se puede destacar que, de los parámetros de mayor importancia, la cantidad de vehículos a enviar por zona es el de mayor incidencia sobre los costos de recolección, debido a que un modelo óptimo de recolección tiene entre sus razones principales usar los recursos con los que cuenta o la mínima cantidad de estos para satisfacer las necesidades de una zona, como en el caso de los modelos propuestos.

Asimismo, los resultados del escenario 2 muestran una reducción del 26% en los costos, debido a la disminución del número de vehículos y el aumento en la frecuencia de recolección, además las utilidades de los 2 escenarios respecto al modelo actual incrementaron en un 100% debido a que en el modelo actual no se tiene contemplado la generación de valor por el aprovechamiento de residuos sólidos. Cabe resaltar, que las utilidades obtenidas en los escenarios propuestos son iguales, por ende, si los costos operacionales del modelo varían, los ingresos operacionales se afectaran en la misma proporción.

Finalmente, se contribuye con la reducción de la contaminación del medio ambiente, extensión de la vida útil del relleno sanitario, y una buena cultura de disposición de residuos en los habitantes de la ciudad de barranquilla.

5. Trabajos futuros

Futuras investigaciones, podrán ser orientadas a desarrollar modelos para optimizar las rutas de recolección domiciliaria, emplear los residuos sólidos recolectados para generar energía, emplear otro tipo de vehículos con variación en sus características mecánicas, localización de centros de acopio e implementación de rutas selectivas a fin de reducir costos obtener utilidades y aumentar la vida útil del relleno sanitario, formalizar el gremio reciclador y acabar con los botaderos a cielo abierto con el propósito de disminuir la contaminación.

Adicional a esto, otra observación a partir de la investigación desarrollada es que en el modelo no se incluyen las zonas comerciales e industriales que generan gran parte de los residuos, ni tampoco el proceso de disposición final, se deja abierta la inclusión de estos temas para próximas investigaciones a fin de diseñar un modelo semejante que optimice los costos del mismo. Adicionalmente se podría hacer un método de recolección o de ruteo para la zona suroccidente ya que tal como se analizó en los resultados, es la fuente de mayor generación de residuos, pero al mismo tiempo la mina de oro más grande del proceso.

Para investigadores e interesados en el tema a un nivel más profundo, podrían implementar un modelo para recolección de residuos vía fluvial y así limpiar fuentes hídricas de la región contaminadas a raíz del vertimiento de residuos, del sector domiciliario, comercial e industrial. Estos temas de recolección vía fluvial son nuevos especialmente en un país como Colombia, lo que supondría un gran avance en tema de gestión y control de residuos el diseñar técnicas de recolección para limpiar fuentes naturales y demás recursos terrestres e hídricos.

6. Referencias

- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2016). Disposition decisions in reverse logistics: Graph theory and matrix approach. *Journal of Cleaner Production*, 137, 93–104.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.045>
- Alcaldía de Barranquilla. (2015). Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS. 2016 - 2027, 178.
- Antonio, J., Aguilar, A., Eduardo, M., & Zambrano, J. (2015). Mejora del servicio de recolección de residuos sólidos urbanos empleando herramientas SIG: un caso de estudio, 19(2), 118–128.
- Argueta, C. M., Camilo, O., Cardona, S., Mauricio, H., Albán, G., Patricia, J., & Moreno, M. (2015). Análisis del tamaño de empaque en la cadena de valor para minimizar costos logísticos: un caso de estudio en Colombia. *Estudios Gerenciales*, 31, 111–121.
<https://doi.org/10.1016/j.estger.2014.06.009>
- Avendaño, E. (2015). Panorama Actual De La Situación Mundial, Nacional Y Distrital De Los Residuos Sólidos . Análisis Del Caso Bogotá D.C . Programa Basura Cero, 112.
- Badenes, R. (2014). La Logística Inversa: Concepto y Definición. Retrieved from https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/46172/Art_Docente_LI_Cast.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bel, G., & Fageda, X. (2010). Empirical analysis of solid management waste costs: Some evidence from Galicia, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(3), 187–193.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.07.015>
- Bing, X., Bloemhof, J. M., Ramos, T. R. P., Barbosa-Povoa, A. P., Wong, C. Y., & van der Vorst, J. G. A. J. (2016). Research challenges in municipal solid waste logistics

management. *Waste Management*, 48, 584–592.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.025>

Bowersox, D. J., Closs, D. J., & Stank, T. P. (2000). Ten Mega-Trends That Will Revolutionize Supply Chain Logistics. *Journal of Business Logistics*, 21(2), 1–15.

Caicedo, A., & Verjel, K. (2010). *Propuesta para la recolección de residuos líquidos resultantes de la elaboración y consumo de alimentos en plazoletas de comida en la ciudad de Bogotá y su posterior transporte para disposición final*. Pontificia Universidad Javeriana.

Córdoba, M. P. (2014). Modelo De Logística Inversa Para La Recuperación Y Aprovechamiento De Residuos Plásticos Abs En Cali, 1–169.

Dahlén, L., & Lagerkvist, A. (2010). Evaluation of recycling programmes in household waste collection systems. *Waste Management & Research*, 28(7), 577–586.

<https://doi.org/10.1177/0734242X09341193>

Dolores, M., & Torres, J. (2007). *Modelo ambiental y financiero para la recolección y manejo de las basuras en el municipio de buenaventura*. Universidad Tecnológica de Pereira.

En, S., & Emser, L. A. (2014). VEHICULO COMPACTADOR DE RESIDUOS Presentado por : ALBERTO MARTINEZ VILLALBA Director Administrativo, Financiero y Comercial . JUSTIFICACION :, (98).

Erik Sandberg. (2011). *The Reatail Industry In Western Europe: Trends, Facts and Logistics Challenges*. Linkoping: Department of Management and Engineering.

Everett, J. W., Maratha, S., Dorairaj, R., & Riley, P. (1998). Curbside collection of recyclables I: Route time estimation model. *Resources, Conservation and Recycling*, 22(3–4), 177–192.

[https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(98\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00008-1)

Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R., & Flapper, S. D. P. (2000). A characterisation of

logistics networks for product recovery. *Omega*, 28(6), 653–666.

[https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(00)00022-0)

Franco, P. (2008). Aproximación teórica al concepto integral de logística. *Ucpr*, 65–90.

Ginter, P. M. y Starling, J. M. (1978). Reverse distribution channels for recycling. *California Management Review*, 73–82. Retrieved from

https://www.researchgate.net/publication/271695885_Reverse_Distribution_Channels_for_Recycling

Gomes, A. P., Matos, M. A., & Carvalho, I. C. (2008). Separate collection of the biodegradable fraction of MSW: An economic assessment. *Waste Management*, 28(10), 1711–1719.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.017>

Govindan, K., Paam, P., & Abtahi, A.-R. (2016). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological Indicators*, 67, 753–768.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.017>

Greco, G., Allegrini, M., Del Lungo, C., Gori Savellini, P., & Gabellini, L. (2014). Drivers of solid waste collection costs. Empirical evidence from Italy. *Journal of Cleaner Production*, 106, 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.011>

Groot, J., Bing, X., Bos-Brouwers, H., & Bloemhof-Ruwaard, J. (2014). A comprehensive waste collection cost model applied to post-consumer plastic packaging waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 85, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.019>

Guarnieri, P., e Silva, L. C., & Levino, N. A. (2016). Analysis of electronic waste reverse logistics decisions using Strategic Options Development Analysis methodology: A Brazilian case. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1105–1117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.025>

- Gutiérrez, V., & Patricia Jaramillo, D. (2009). Reseña del Software Disponible en Colombia Para la Gestión de Inventarios en Cadenas de Abastecimiento. *Estudios Gerenciales*, 25(110), 125–153. [https://doi.org/10.1016/S0123-5923\(09\)70065-8](https://doi.org/10.1016/S0123-5923(09)70065-8)
- Iriarte, A., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2009). LCA of selective waste collection systems in dense urban areas. *Waste Management*, 29(2), 903–914. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.002>
- Jacobsen, R., Buysse, J., & Gellynck, X. (2013). Cost comparison between private and public collection of residual household waste: Multiple case studies in the Flemish region of Belgium. *Waste Management*, 33(1), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.015>
- Jaramillo, G., & Zapata, L. M. (2008). Aprovechamiento De Los Residuos Sólidos Orgánicos En Colombia, 116. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ltda, L. (2013). Ficha tecnica.
- Maquera, G. (2012). Logística verde e Inversa, Responsabilidad Universitaria Socioambiental Corporativa y Productividad. *Apuntes Universitarios*, 2(1), 31–54. <https://doi.org/10.17162/AU.V0I1.16.G13>
- Márquez, J. (2011). Macro y microruteo de residuos sólidos residenciales, 1–91.
- Martin Christopher. (1999). *Logistica. Aspectos Estrategicos*. (LIMUSA, Ed.). Mexico.
- Matsumoto, S. (2011). Waste separation at home: Are Japanese municipal curbside recycling policies efficient? *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 325–334. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.005>
- McDougall, F., White, P., Franke, M., & Hindle, P. (2008). *Integrated solid waste management: a life cycle inventory*. *Chemistry &* <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2369-7>
- Niza, S., Santos, E., Costa, I., Ribeiro, P., & Ferrão, P. (2014). Extended producer responsibility

- policy in Portugal: A strategy towards improving waste management performance. *Journal of Cleaner Production*, 64, 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.037>
- Paniagua, N., Giraldo, E., & Castro, L. (2011). Guía para el adecuado manejo de los residuos sólidos y peligrosos. *Revista*, 32. <https://doi.org/10.1192/bjp.37.156.128>
- Passarini, F., Vassura, I., Monti, F., Morselli, L., & Villani, B. (2011). Indicators of waste management efficiency related to different territorial conditions. *Waste Management*, 31(4), 785–792. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.11.021>
- Pires, A., Martinho, G., & Chang, N.-B. (2011). Solid waste management in European countries: a review of systems analysis techniques. *Journal of Environmental Management*, 92(4), 1033–1050. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.024>
- Prakash, C., & Barua, M. K. (2016). An analysis of integrated robust hybrid model for third-party reverse logistics partner selection under fuzzy environment. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 63–81. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.12.011>
- Prestación, P. D. E., & Servicio, D. E. L. (2016). Distrito de Barranquilla.
- Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.005>
- Rascon, O. Posada & A., M. S. (2012). El Otro lado de la logistica, una vision estrategica: Tendencia del aprovisionamiento en las cadenas de valor para el desarrollo sostenible.
- Rojas, J., Salazar, R., Sepúlveda, Sepúlveda, M., & M Santelices, I. (2006). Residuos sólidos domiciliarios: Logística, una herramienta moderna para enfrentar este antiguo problema. *Ingeniería Industrial*, N°1(0717–9103), 77–88. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3997023.pdf>

- Rubio Lacoba, S. (2003). El sistema de logística inversa en la empresa: análisis y aplicaciones, 299. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=305>
- Runt, T., & Especiales, O. (2016). Tarifas Soat 2016.
- Salvador, N., Hervert, Z., Galván, F. S., Bautista, H., Rodríguez, R., José, J., ... Rojas, R. (2015). Diseño de un sistema de recolección de residuos de botellas de plástico mediante la metodología de Checkland optimizada por, (167), 1–29.
- Shearer, L., Gatersleben, B., Morse, S., Smyth, M., & Hunt, S. (2016). A problem unstuck? Evaluating the effectiveness of sticker prompts for encouraging household food waste recycling behaviour. *Waste Management*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.036>
- Soto Zuluaga, J. P., Thiell, M., & Colomé Perales, R. (2017). Reverse cross-docking. *Omega (United Kingdom)*, 66, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.01.010>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios República de Colombia. (2015). *Disposición Final de Residuos Sólidos - Informe Nacional*. [https://doi.org/ISSN: 2422-2941](https://doi.org/ISSN:2422-2941)
- Transporte, M. De. (2006). Estructura de costos de operación vehicular 2006. *Ministerio de Transporte*, 7.
- Ustundag, A., & Tanyas, M. (2009). The impacts of Radio Frequency Identification (RFID) technology on supply chain costs. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.09.001>
- Valle, D. E. L., & Cauca, D. E. L. (2016). Competitividad y cadenas de abastecimiento en el sector productivo del valle del cauca, colombia, 4(1), 77–87.
- Vázquez, J. F. (2004). Logística inversa, 121–132. <https://doi.org/9703217133>
- Victor, D., & Agamuthu, P. (2013). Strategic environmental assessment policy integration model

for solid waste management in Malaysia. *Environmental Science and Policy*, 33, 233–245.

<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.06.008>

Wagner, T. P., & Broaddus, N. (2016). The generation and cost of litter resulting from the curbside collection of recycling. *Waste Management*, 50, 3–9.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.004>

Wang, Z., Dong, X., & Yin, J. (2016). Antecedents of urban residents' separate collection intentions for household solid waste and their willingness to pay: Evidence from China.

Journal of Cleaner Production, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.223>